



João Vasco Peguicha dos Mártires Paulino

Modelação de hélices utilizando “Surrogate Modeling”

Otimização de hélices em motores de combustão interna para utilização em plataformas marítimas autónomas (cascos-planantes)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica



Alfeite
2015



ESCOLA NAVAL



talant de bi-faire

João Vasco Peguicha dos Mártires Paulino

Modelação de hélices Utilizando “Surrogate Modeling”

***Otimização de hélices em motores de combustão interna para utilização em
plataformas marítimas autónomas (cascos-planantes)***

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na
especialidade de Engenheiros Navais - Ramo de Mecânica**

Orientação de: CFR EN-MEC (ACN) Pires da Silva

Coorientação de: CMG Maia Martins

O Aluno Mestrando

O Orientador

[João Mártires Paulino]

[Paulo Pires da Silva]

**Alfete
2015**

*“A experiência é uma lanterna dependurada nas costas que apenas ilumina o
caminho já percorrido”*

- Confúcio

Dedicatória

Dedico todo o trabalho que empreguei na realização desta dissertação de mestrado, bem como todo o esforço aplicado ao longo destes 5 anos de Escola Naval à minha família e amigos que sempre me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos por que passei.

Agradecimentos

Agradeço a todos os meus familiares e amigos que me apoiaram ao longo do meu percurso académico e principalmente nestes 5 anos de Escola Naval.

Deixo uma palavra de carinho à minha mãe Inês Ferreira que sempre tudo fez para que eu atinja os objetivos na minha vida com sucesso. Quero também agradecer ao meu pai Manoel Ferreira que se orgulha de mim a cada dia que passa.

Quero que o meu percurso académico sirva também de fonte de inspiração para o futuro dos meus sobrinhos Carlota e Salvador Contente, para saberem que com esforço e dedicação tudo é possível.

Agradeço ao meu orientador, CFR EN-MEC (ACN) Pires da Silva, e ao meu coorientador, CMG Maia Martins, ao indicarem-me o melhor rumo a seguir na elaboração desta dissertação de mestrado.

Gratulo o meu camarada de curso e amigo, Ricardo Cardoso da Silva, por todos os momentos e a ajuda prestada ao longo dos nossos 5 anos de curso, em especial este último ano.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer ao pessoal do Clube Naval de Oficiais de Cadetes da Armada (CNOCA), sobretudo aos Mestre Dias, Sargento Frazão, e Mestre Cardoso, aos Cabo Horta e Cabo Barreto, pela colaboração e disponibilidade, demonstradas durante a execução dos testes na bacia de manobras.

Resumo

No seguimento dos conceitos desenvolvidos no projeto ICARUS pretende-se a criação de uma semirrígida autónoma para a execução de diversas missões, quer estas sejam missões de salvamento marítimo ou transporte de cargas. Assim, esta dissertação de mestrado pretende desenvolver uma metodologia através de “*Surrogate Modeling*”, com a qual será possível a otimização do hélice para uma determinada plataforma de casco planante equipada com um motor de combustão interna. Este método computacional assenta na interpolação dos resultados obtidos através de experimentação de um número reduzido de parâmetros e obtendo no final, idealmente, o hélice mais adequado à plataforma estudada, dependendo das condições que lhe serão impostas.

Palavras-chave: Hélices; Motores de Combustão Interna; Projeto “*ICARUS*”; Redes Neurais; “*Surrogate Modeling*”.

Abstract

Following the concepts developed in Project ICARUS, it is aimed to create an unmanned rigid hull inflatable boat for performing various tasks, whether they are maritime rescue missions or cargo transport. Thus, this dissertation aims to develop a methodology through "Surrogate Modeling", with which the propeller optimization for a planning hull platform equipped with an internal combustion engine is possible. This computational method is based on the interpolation of results obtained by testing a small number of parameters and in the end obtaining, ideally, the most appropriate propeller for the platform studied, depending on the conditions to be imposed.

Key-Words: ICARUS Project; Internal combustion engine; Neural Networks; Optimization; Propeller; Surrogate Modeling.

Índice Geral

Dedicatória.....	VII
Agradecimentos	IX
Resumo	XI
Abstract.....	XIII
Índice Geral	XV
Índice de Figuras.....	XXI
Índice de Equações	XXIII
Índice de Tabelas	XXV
Lista de Símbolos	XXVII
Abreviaturas.....	XXVIII
Introdução	1
Justificação do tema.....	1
Objetivos.....	2
Metodologias	2
1. Hélices	5
1.1 Enquadramento Histórico	5
1.2 Principais caraterísticas	9
1.2.1 Passo	10
1.2.2 Número de Pás	12
1.2.3 Diâmetro	12
1.2.4 Secção das pás	13
1.2.5 Áreas das pás	13
1.2.6 Abatimento axial (Rake).....	14
1.2.7 Deslocamento circunferencial (Skew).....	15
1.3 Princípio de funcionamento	15

1.4 Cavitação	17
1.4.1 Princípio físico.....	17
1.4.2 Ruído.....	20
1.4.3 Erosão	21
1.4.4 Vibrações	22
1.4.5 Perda de força propulsiva	23
1.4.6 Considerações geométricas.....	23
1.5 Projeto de Hélices	25
1.5.1 Teoria do disco atuador e elementos de pá.....	25
1.5.2 Teoria da linha de sustentação e superfície sustentadora.	28
1.5.3 Séries sistemáticas de hélices	31
1.5.4 Computational Fluid Dynamics Analysis (CFD)	33
1.5.5 “ <i>Surrogate Modeling</i> ”: Uma alternativa na modelação	34
2. Motores de combustão interna.....	37
2.1 Motores Fora de Borda	37
2.2 Relação hélice/motor	40
3. Redes neurais.....	45
3.1 Processamento dos dados	48
3.2 Divisão dos dados	49
3.3 Overfitting.....	49
3.4 Modelos de redes neurais.....	51
3.5 Arquitetura de uma rede neuronal	52
4. Modelo de plano de testes	57
5. Planeamento dos testes	59
5.1 Testes com a semirrígida	59
5.2 Estudo com as redes neurais	64

6.	Discussão de resultados	69
6.1	Testes com a semirrígida	69
6.1.1	Sugestão de melhorias para trabalhos futuros.....	71
6.2	Testes com o MATLAB	72
6.2.1	Normalização dos dados	72
6.2.2	Seleção da arquitetura da rede	73
6.2.3	Aplicação da rede.....	78
6.2.4	Comparação dos resultados.....	80
6.2.5	Sugestão de melhorias para trabalhos futuros.....	81
	Conclusão	83
	Trabalhos futuros	85
	Bibliografia	87
	Apêndices	91
	Apêndice 1 - Material necessário para os testes	93
	Apêndice 2 - Fita de Tempo	95
	Apêndice 3 - Percurso principal para os ensaios	97
	Apêndice 4 - Percurso secundário para os ensaios	99
	Apêndice 5 - Caderno de Provas	101
	Apêndice 6 - Motor fora de borda Yamaha 30 hp, quatro tempos	117
	Apêndice 7 - Semirrígida utilizada para os testes.....	119
	Apêndice 8 - Escala no depósito de combustível	121
	Apêndice 9 - Regimes de Rotação.....	123
	Apêndice 10 - Os três hélice Mercury utilizados (vista por cima)	125
	Apêndice 11 - Os três hélice Mercury utilizados (vista lateral)	127
	Apêndice 12 – Altura da maré para a BNL no dia 28 de Abril de 2015	129
	Apêndice 13 - Altura da maré para a BNL no dia 30 de Abril de 2015	131

Apêndice 14 - Altura da maré para a BNL no dia 04 de Maio de 2015	133
Apêndice 15 - Altura da maré para a BNL no dia 05 de Maio de 2015	135
Apêndice 16 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga A ...	137
Apêndice 17 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga B....	139
Apêndice 18 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga C....	141
Apêndice 19 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga A ...	143
Apêndice 20 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga B....	145
Apêndice 21 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga C....	147
Apêndice 22 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga A ...	149
Apêndice 23 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga B....	151
Apêndice 24 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga C....	153
Apêndice 25 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga A ...	155
Apêndice 26 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga B....	157
Apêndice 27 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga C....	159
Apêndice 28 – Tabela resumo dos dados registados	161
Apêndice 29 – Tabela de conversão dos tempos e consumos por teste em consumo horário	163
Apêndice 30 - Médias e desvios-padrão	165
Apêndice 31 - Dados Normalizados (Hélice 11,25"X12P)	167
Apêndice 32 - Dados Normalizados (Hélice 10,1"X14P)	169
Apêndice 33 - Dados Normalizados (Hélice 12,25"X9P)	171
Apêndice 34 - Dados Normalizados (Hélice 10,3"X13P)	173
Apêndice 35 - Código que analisa as várias combinações de rede.....	175
Apêndice 36 - Linha de comando que analisa o menor erro em cada combinação	
177	
Apêndice 37 - Tabela erros mínimos.....	179

Apêndice 38 - Tabela de comparação dos erros de teste com os erros de validação	181
Apêndice 39 - Programa para se atingir o erro mínimo.....	183
Apêndice 40 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino e de transferências 1.....	185
Apêndice 41 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino 2 e de transferências 1.....	187
Apêndice 42 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino 3 e de transferências 1.....	189
Apêndice 43 – Erros de teste mínimos resultantes do treino com duas camadas intermédias	191
Apêndice 44 - Linha de código que grava a matriz dos pesos da rede para o erro de teste menor que 0,039	193
Apêndice 45 – Erros de teste obtidos com a arquitetura de rede A para 2, 3, 4 e 6 neurónios na camada intermédia	195
Apêndice 46 – Matriz dos pesos das variáveis de entrada para cada neurónio	197
Apêndice 47 - Linha de código para utilizar a rede.....	199
Apêndice 48 - Linha de código para obter o consumo mínimo.....	201
Apêndice 49 - Tabela com os hélices mais eficientes	203

Índice de Figuras

Figura 1 - Hélice desenhada por Robert Hooke (1683)	5
Figura 2 - Proposta de Bernoulli, à esquerda e Proposta de Paucton, à direita	6
Figura 3 - Proposta de Bramah, à esquerda e Proposta de Shorter, à direita	7
Figura 4 - Hélices Ericsson (esquerda) e hélices Arquimedianos	7
Figura 5 - Proposta de Hirsch, à esquerda e Proposta de Zeise, á direita	8
Figura 6 - Nomenclatura de um hélice	9
Figura 7 - Analogia entre o passo de um parafuso e um passo de um hélice	10
Figura 8 - Representação do Avanço, do passo e do Recuo	12
Figura 9 - Diâmetro do Hélice	13
Figura 10 - Secção das pás.....	13
Figura 11 - Áreas Projetada, Desenvolvida e Expandida	14
Figura 12 -Abatimento Axial (Rake).....	14
Figura 13 - Efeito do deslocamento circunferencial.....	15
Figura 14 - Sistema de forças que atuam nas pás de um hélice.....	16
Figura 15 - Diagrama de fases da água.....	18
Figura 16 - Formação de bolhas de vapor	18
Figura 17 - Tipos de cavitação: (A) cavitação de bolha; (B) cavitação de bolsa; (C) Cavitação de vórtice de extremidade; (D) Cavitação de Vórtice entre o hélice e a querena.....	20
Figura 18 - Processos de erosão: (a) onda de choque; (b) microjato.	21
Figura 19 - Consequências da cavitação, “pitting” e erosão do hélice.	22
Figura 20 - Flutuação de pressão devido à passagem do hélice com cavitação e sem cavitação.....	23
Figura 21 - Diagrama de Burril para escoamento uniforme	24
Figura 22 - Variáveis implícitas na teoria do Disco Atuador	26
Figura 23 - Esquematização das variáveis envolvidas	27
Figura 24 - Teoria clássica da linha sustentadora de Prandtl.....	29
Figura 25 - Linha de sustentação (a); Ação do hélice descrito por linha de sustentação (b).....	29
Figura 26 - Distribuição dos vórtices na pá (a); Superfície de vórtices representativos da pá de perfil (b)	30

Figura 27 - Distribuição de correntes de entrada e saída ao longo do perfil da pá	31
Figura 28 - Aspeto geométrico das pás da série B de Wageningen	32
Figura 29 - Série B de Wageningen para hélices de duas pás, razão de área expandida 0.3 e razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4.	33
Figura 30 - Constituição de um motor fora de borda a quatro tempos	37
Figura 31 - Ciclo operativo de um motor de explosão a quatro tempos	39
Figura 32 - Caixa de engrenagens redutora inversora	40
Figura 33 - Equilíbrio entre potência e binário entregue e de carga.....	41
Figura 34 – Equilíbrio entre motor e hélice	42
Figura 35 - Área de Operação	43
Figura 36 - Operação a baixas rotações	44
Figura 37 - Dados de Treino	46
Figura 38 - Resultado do treino da rede neuronal.....	47
Figura 39 - Fluxograma do treino de uma rede neuronal	48
Figura 40 - Resposta de uma função polinomial de ordem 2,10,16 e 20.	50
Figura 41 - Modelo Percepção Simple.....	51
Figura 42 - Exemplo de uma rede de Kohonen	52
Figura 43 - Exemplo da arquitetura de uma rede de Hopfield.....	52
Figura 44 - Rede neuronal elementar.....	53
Figura 45 - Funções transferência.....	54
Figura 46 - Esquema e Diagrama de uma rede neuronal com uma só camada ..	54
Figura 47 - Rede Neuronal com duas camadas	55
Figura 48 - Componentes de ligação do hélice ao veio	63

Índice de Equações

Equação 1 - Cálculo da velocidade do parafuso (Silva, 1953)	11
Equação 2 - Coeficiente de Recuo	11
Equação 3 - Número de Cavitação	19
Equação 4 - Coeficiente de Burril	24
Equação 5 - Cálculo do parâmetro $q_{0,7R}$	25
Equação 6 - Velocidade local a 70% do raio do hélice	25
Equação 7 - Cálculo do impulso gerado	26
Equação 8 - Potência fornecida pelo disco	26
Equação 9 - Rendimento ideal do hélice	26
Equação 10 - Cálculo do impulso gerado	27
Equação 11 - Cálculo do binário gerado.....	27
Equação 12 - Rendimento do hélice	28
Equação 13 - Força de sustentação gerada	30
Equação 14 - Função dos dados recolhidos	50
Equação 15 - Calculo do erro médio quadrático	64
Equação 16 - Algoritmo da função sigmóide tangente hiperbólica.....	77
Equação 17 - Linha de código para separar os pesos	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dados de experimentação	46
Tabela 2 - Fita de tempo de um só teste	60
Tabela 3 - Variáveis de teste.....	61
Tabela 4 - Algoritmos de treino utilizados para a seleção da rede	65
Tabela 5 – Funções de transferência da camada de saída.....	65
Tabela 6 - Funções de transferência da(s) camada(s) intermédia(s).....	66
Tabela 7 - Hélice mais eficiente para cada condição de carga e regime de rotações	71
Tabela 8 - Arquiteturas vencedoras	74
Tabela 9 - Tabela resumo dos hélices mais económicos para as várias combinações de carga e posição do acelerador caso o estado de maré esteja a encher ou a vazar	80
Tabela 10 - Consumos mínimos obtidos nos testes com a semirrígida	80
Tabela 11 - Consumos mínimos obtidos através da rede neuronal treinada.....	81
Tabela 12 - Diferença de consumo	81

Lista de Símbolos

a – Avanço do hélice;

A_p – Área Projetada;

C – Comprimento da corda;

c_d – Coeficiente de arrasto;

c_l – Coeficiente de sustentação;

dD – Arrasto;

dF_Q – Binário;

dL – Sustentação;

dT – Impulso;

e – valor de saída da função;

D – Diâmetro do hélice;

\dot{E}_P – Energia cinética por unidade de tempo;

g – valor de entrada na rede;

L – Força de sustentação gerada;

\dot{m} – Caudal mássico;

mse – Mean square error;

n – Número de rotações por unidade de tempo;

N – Número de dados de teste;

p – Passo do hélice;

P_0 – Pressão não perturbada;

P_D – Potência fornecida pelo disco;

P_E – Potência efetiva;

P_v – Pressão de vapor à temperatura ambiente de referência;

r – raio do hélice;

T – Impulso;
 V – Velocidade teórica;
 V' – Velocidade real;
 V_a - Velocidade de entrada do escoamento no plano do hélice;
 V_{ax} – Velocidade axial;
 V_R – Valor absoluto da velocidade local;
 V_∞ - Velocidade do fluído;
 x – Valor a normalizar;
 \bar{x} – Média do conjunto de dados;
 y – valor normalizado;
 Y – Valor real obtido;
 \hat{Y} – Valor de saída da rede;
 Z – Número de pás;
 β - Ângulo ente as duas componentes de velocidade;
 γ – Razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto;
 η_i – Rendimento ideal;
 ρ – Massa específica;
 σ – Número de cavitação;
 σ_p – Desvio padrão;
 σ_v – Número de cavitação para a pressão de vapor;
 Γ_b – Intensidade dos vórtices;
 τ_c – Coeficiente de Burril;
 Ωr – Velocidade rotacional.

Abreviaturas

BAR – Blade area ratio;

BMEP – Break mean effective pressure;

BNL – Base Naval de Lisboa;

CFD – Computational Fluid Dynamics;

CNOCA – Clube Naval dos Oficias e Cadetes da Armada;

DAR – Developed area ratio;

EAR – Expanded area ratio;

EBF – Ellipsoidal basis function;

NSMB – Netherland Ship Model Basin;

PAR – Projected area ratio;

RBF – Radial basis function;

RPM – Rotações por minuto;

SAR – Search and Rescue.

Introdução

Justificação do tema

Este tema, bem como o tema do camarada Cardoso da Silva, têm por base a mesma estrutura de investigação, assim sendo parte do enquadramento teórico, englobando os capítulos 1, 3 e 4 são idênticos.

Na Marinha Portuguesa os hélices em motores fora de borda são utilizados em variadíssimos cenários como por exemplo nos zebros dos fuzileiros, das fragatas, semirrígidas da polícia marítima, das corvetas e das lanchas. Ao nível dos projetos de investigação em que a Marinha está envolvida pouca relevância se tem dado aos hélices, não se fazendo a devida análise da otimização do hélice para a plataforma em que vai ser utilizado, como é o caso do Projeto “*ICARUS*”, no qual os investigadores focam-se mais na área de comando e controlo das plataformas. Os hélices que são utilizados neste tipo de projetos e embarcações encontram-se disponíveis no mercado em modelos *standard*. Estes hélices são projetados para um determinado motor e para uma determinada condição de carregamento, velocidade e forma de casco onde só, respeitando estes parâmetros, é que é possível obter os consumos ideais. Estas condições ideais não se verificam em grande parte da vida útil das plataformas e durante os estudos dos diversos projetos que envolvam plataformas marítimas.

Assim, esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo selecionar um conjunto de hélices que, consoante a condição de carga e velocidade da plataforma marítima, determina qual o hélice que deverá ser utilizado para se obter as condições de consumo mínimo. Neste estudo analisar-se-á o comportamento de uma plataforma de casco planante, equipada com um motor de combustão interna, face ao hélice que lhe é instalado, sendo que no futuro a metodologia utilizada nesta dissertação ou mesmo a plataforma estudada, poderão ser utilizadas em projetos de plataformas autónomas robotizadas, às quais se vai requerer diferentes tipos de missões, com determinadas velocidades e carregamentos.

O estudo do hélice é muito complicado, tem por base a análise de conceitos físicos muito complexos sendo uma análise muito dispendiosa e extenuante, levando à procura de outras soluções que contornem os métodos clássicos muito morosos e financeiramente onerosos.

Aliando os assuntos que foram ministrados nas cadeiras de Arquitetura Naval, Mecânica dos Fluidos, Programação I e II, Sistemas de Apoio à Decisão, Navegação I e II, Estatística e Máquinas Marítimas I e II, pretende-se determinar um conjunto de hélices que sejam ideais para uma semirrígida autónoma utilizando “*Surrogate Modeling*”, caracterizado como um método de engenharia que gera modelos que aproximam o comportamento da entrada/saída de dados multivariados de sistemas complexos, baseado em simulações computacionais.

Para o estudo será necessário realizar diversas provas e registar os parâmetros de entrada e saída selecionados como relevantes para vários hélices e condições de carga. Os parâmetros de entrada e os dados de saída obtidos vão servir para o treino de uma rede neuronal que, posteriormente, indicará qual o hélice ideal para os diferentes tipos de missões exigidas à plataforma planante autónoma, dentro da gama dos parâmetros de entrada.

Objetivos

O tema que irá ser abordado nesta dissertação de mestrado tem como principal objetivo a modelação de um conjunto de hélices através de “*Surrogate modeling*” para uma plataforma de casco planante autónoma, com motor de combustão interna que satisfaça as condições de carregamento e de velocidade requeridos pela missão, tendo em conta o menor consumo, dentro da gama de parâmetros de entrada.

Metodologias

A abordagem por “*Surrogate Modeling*” exige uma grande base de dados, relativos a provas realizadas em diferentes condições. Quanto maior o volume de dados, maior será a exatidão desta metodologia, uma vez que, o que esta realiza de forma genérica, incide na aprendizagem supervisionada a partir de bases de dados. Pode-se dizer que este método aprende de forma “automática”, executando interpolações não-lineares entre os dados. O que se pretende, com as provas que terão de ser levadas a cabo, é que estas sejam feitas mediante determinadas condições de entrada, com diversas respostas associadas às mesmas. A análise que esta metodologia fará, tem por base a aprendizagem pela observação dos efeitos tidos nas variáveis de saída alterando as condições de entrada. Esse estudo permitirá obter uma previsão estimada de quais são as condições de entrada que trarão o efeito desejado, ou o mais proveitoso.

Os objetivos traçados exigiram a realização de provas, com os motores de combustão interna que equipam uma plataforma autónoma de casco planante. A diversidade das condições de entrada, irá ser conseguida por intermédio de testes com diversos hélices, regimes de motores, carregamento, deslocamento, ou seja, jogando com as características da plataforma e do hélice que equipa os motores. Genericamente, os resultados destas experiências serão registados, e proceder-se-á posteriormente à análise por “*Surrogate Modeling*”. Permitirá este modo modelar o hélice que será mais proveitoso tendo em vista as condições tidas como ideais, seja a nível de consumos, de velocidade máxima, ou manobrabilidade, entre outros.

Esta metodologia é utilizada por ser uma forma de tratar um problema bastante complexo de engenharia, de forma mais simples e com base empírica. Reduz também em muito, os testes que serão necessários executar para um determinado problema. A modelação de hélices não é explorada, por ser algo bastante complexo de se executar e estar fora do objetivo do trabalho.

Utilizar-se-á hélices com dimensões, estrutura e *design* “*commercial off the shelf*” (COTS), não se restringindo à partida qual o que melhor se adapta à relação plataforma-potência do motor.

1. Hélices

1.1 Enquadramento Histórico

A invenção dos hélices remonta ao ano 250 A.C, com a invenção de uma bomba de parafuso adaptada para impulsionar um líquido, a qual foi desenhada por *Archimedes*. Esta invenção adquiriu o nome do seu criador e foi utilizada para a análise e compreensão do efeito da propulsão através da sua comparação com uma rosca. Leonardo da Vinci foi o segundo maior impulsionador no estudo dos hélices desenhando uma alternativa à propulsão baseada num parafuso, criando assim um sistema de pás semelhantes às usadas para o arrefecimento do ar (Carlton, 2012).

Robert Hooke, mais conhecido pela teoria da elasticidade, também deu o seu contributo na evolução dos hélices para que estes adquirissem a forma que é utilizada nos dias de hoje. Inicialmente Hooke desenhou um moinho de água horizontal composto por 6 palhetas de madeira ligadas a um veio rotativo que se encontrava na vertical, esta ligação era feita através de rebites e na base as palhetas eram compostas por engrenagens que restringiam o movimento da palheta a 180° em torno do seu eixo, no final de uma revolução completa do rotor. Mais tarde após uma melhoria da sua ideia inicial, Hooke utilizou a sua invenção para a medição de correntes e previu a sua potencial utilização na propulsão de navios, caso fosse transmitido movimento ao hélice. É possível ver-se na Figura 1 a ideia de hélice desenhada por Hooke, composta por quatro lâminas retangulares seguras a braços radiais em que as lâminas estavam inclinadas segundo o plano de rotação (Carlton, 2012).

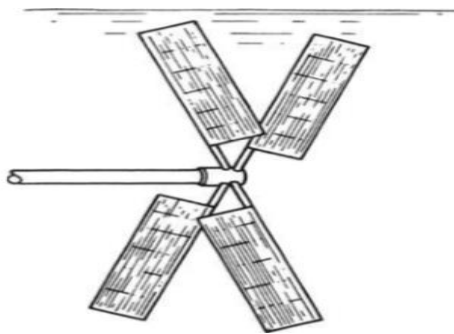


Figura 1 - Hélice desenhada por Robert Hooke (1683)¹

¹ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

No ano de 1752 a *Académie des Sciences* em França, Paris, promoveu um concurso no qual existia um prémio para a pesquisa que promovesse o maior avanço científico, utilizando métodos teóricos, na área de arquitetura naval. Neste concurso participaram algumas das mentes mais brilhantes que surgiram na altura e que mais contribuíram para o desenvolvimento e evolução da ciência nas suas diferentes áreas, mentes como as de d'Alembert, Euler e Bernoulli. Bernoulli presenteou este concurso com um hélice em roda que seria propulsionado através de um motor a vapor. Paralelamente com Bernoulli houve um matemático Francês chamado Paucton que sugeriu uma abordagem baseada nas ideias de *Archimedes* (Carlton, 2012).

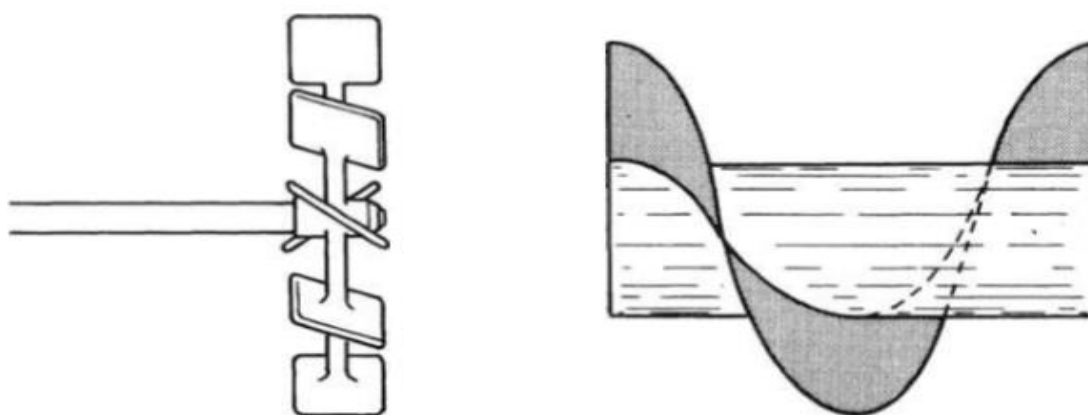


Figura 2 - Proposta de Bernoulli, à esquerda e Proposta de Paucton, à direita²

Posteriormente, em 1782 em Inglaterra, Joseph Bramah sugeriu que o hélice fosse colocado à popa do navio. Esta proposta é a que mais se assemelha à que é utilizada nos dias que correm, um hélice com um número reduzido de pás fixo a um veio horizontal e que passa através do casco abaixo da linha de água (Carlton, 2012).

Edward Shorter, em 1802, utilizou a ideia inicial de Bramah com o intuito de a usar em navios à vela, sendo que o principal objetivo de Shorter era reduzir os vedantes que iriam ser utilizados, para evitar que a água entrasse no navio, seguindo o esquema de Bramah. Assim Shorter projetou um veio que passava acima da linha de água e que era propulsionado por oito homens que rodavam um cabrestante. Com este projeto conseguiu transportar o navio *Doncaster* de Malta a Gibraltar e regressar, com boas condições metrológicas, a uma velocidade de 1,2 Nós (Carlton, 2012).

² Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

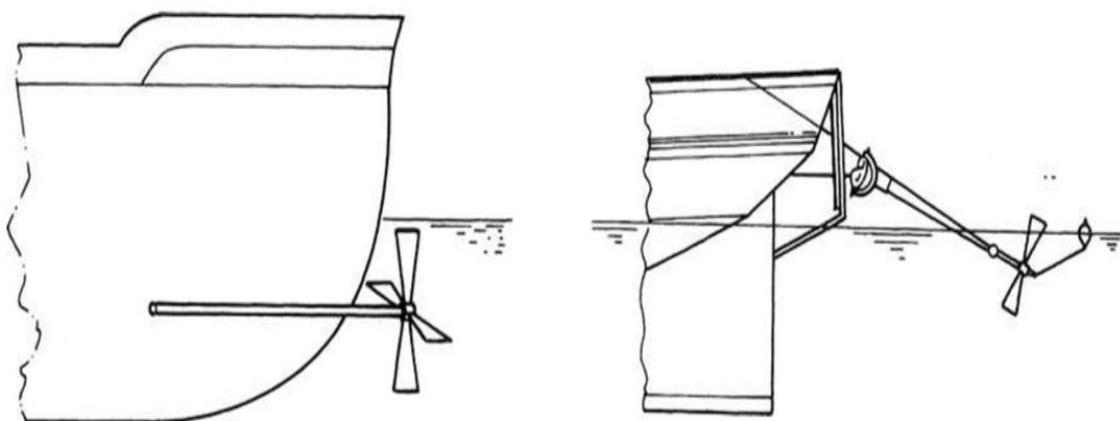


Figura 3 - Proposta de Bramah, à esquerda e Proposta de Shorter, à direita³

Nos anos que se seguiram, o Coronel John Stevens, um homem com um substancial financiamento, construiu um barco com 7,62 metros de comprimento no qual instalou um motor a vapor inventado por Watt e acoplou-o diretamente a um hélice de 4 pás compostas por placas de ferro (Carlton, 2012).

Em 1824 John Ericsson projetou os primeiros hélices contra rotativos. O sistema é composto por dois hélices no mesmo veio e que rodam em sentidos contrários. O hélice a jusante tem o propósito de reduzir a perda de energia cinética de rotação do hélice de montante (Universidade Técnica de Lisboa, 2002), sendo o diâmetro do hélice de jusante inferior ao diâmetro do hélice de montante (ou de vante).

Francis Petit Smith, na mesma época, com os seus estudos demonstrou que os hélices *Arquimedianos* eram em tudo superiores aos hélices contra rotativos em termos de estabilidade e escoamento da água. É possível observar na Figura 4 os dois tipos de hélices contra rotativos e *Arquimedianos* (Carlton, 2012).

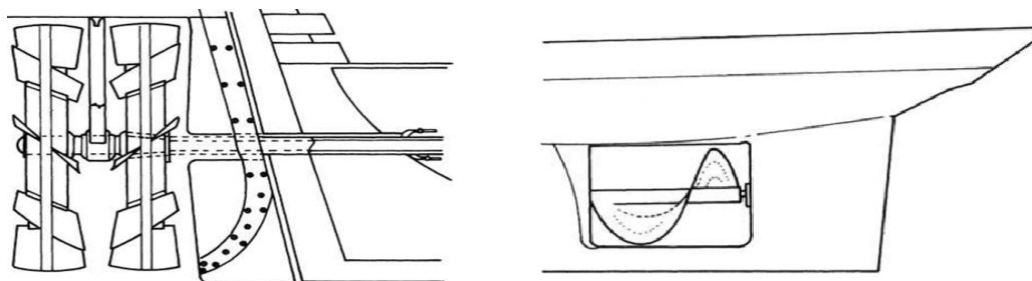


Figura 4 - Hélices Ericsson (esquerda) e hélices Arquimedianos⁴

³ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

⁴ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

Apesar de todos os desenvolvimentos que os hélices *Arquimedianos* sofreram ao longo dos anos, em 1842 voltou-se a estudar os hélices de moinho, estudados por Hooke. Os primeiros hélices que surgiram eram compostos por três pás e formavam um terço de uma volta de um parafuso. Estes hélices foram utilizados no navio *Napoleon*, que possuía um deslocamento de 376 toneladas, no qual o motor a vapor atingia as 126 rotações por minuto (RPM) e o navio com estas rotações alcançava uma velocidade de 12 nós (Carlton, 2012).

A primeira vez que surgiu uma tentativa de otimização dos hélices para um navio foi em 1845, quando foi necessário saber qual seria o melhor hélice para aplicar no *HMS Rattler* para que, em uma corrida com o seu navio irmão *HMS Polyphemus*, pudesse superá-lo em velocidade. Para tal foi analisado o comportamento de 32 hélices, sendo selecionado um hélice com 2 pás e com um diâmetro de 3,05 metros com um passo de 3,35 metros e com o qual o navio alcançava uma velocidade máxima de 9 nós. Após vários testes e competições com outros navios à vela e propulsionados por motores a vapor, o Almirante Britânico Sir Richard Rickerton ficou muito entusiasmado com o desempenho destes navios e resolveu encomendar sete fragatas com propulsão de parafuso (Carlton, 2012).

No final do Século XIX os estudos realizados prendiam-se mais na análise dos hélices em termos do efeito da distribuição radial do passo, no ajuste das pás, na morfologia das pás e na cavitação. Hirsch em 1860 patenteou um hélice de passo fixo no qual variava tanto a distância da linha média da secção transversal da pá à linha helicoidal que une o bordo de ataque ao bordo de fuga como o passo radial do hélice ao longo da pá. Zeise levou a variação do passo ao longo da pá mais à frente, quando aumentou o passo das secções internas da pá, na tentativa de aproveitar também a impulsão produzida por estas zonas da pá (Carlton, 2012).

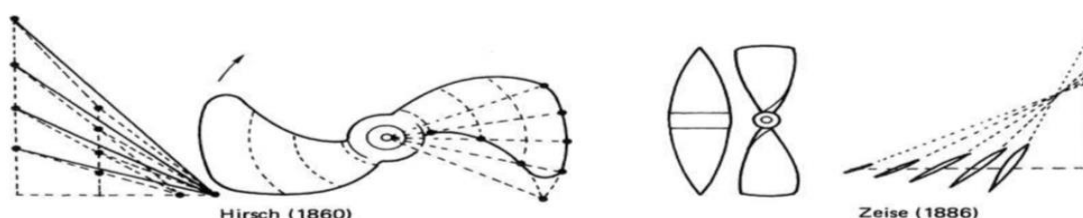


Figura 5 - Proposta de Hirsch, à esquerda e Proposta de Zeise, à direita⁵

⁵ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

Em paralelo com os estudos realizados nos hélices que eventualmente viriam a ser os hélices de passo fixo, decorriam também no período de 1844 a 1911 estudos nos hélices de passo controlável. Em 1868, o Sr. H.B. Young patenteou um método de alteração do passo, no qual eram utilizadas duas hastes ligadas às pás e que passavam por um veio oco, ligado a uma vareta de parafuso que ao enroscar ajusta o passo da lâmina (Carlton, 2012).

1.2 Principais características

O hélice é um componente formado por um certo número de pás que se dispõem simetricamente em torno de um eixo, o cubo do hélice. O hélice é colocado na extremidade do veio propulsor. Dependendo do seu sentido de rotação, o hélice pode ser designado por hélice de passo direito ou hélice de passo esquerdo. Para se determinar que tipo de passo tem um determinado hélice, observa-se o hélice em funcionamento a partir do lado da descarga do escoamento, e caso se verifique que o hélice roda no sentido dos ponteiros do relógio, então esse hélice é um hélice de passo direito, caso o hélice rode no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio é chamado hélice de passo esquerdo (Silva, 1953). A zona envolvente de uma pá do hélice pode ser dividida em duas áreas, uma de sucção e uma de pressão, correspondendo ao dorso e à face da pá respectivamente, o qual é possível observar na Figura 6.

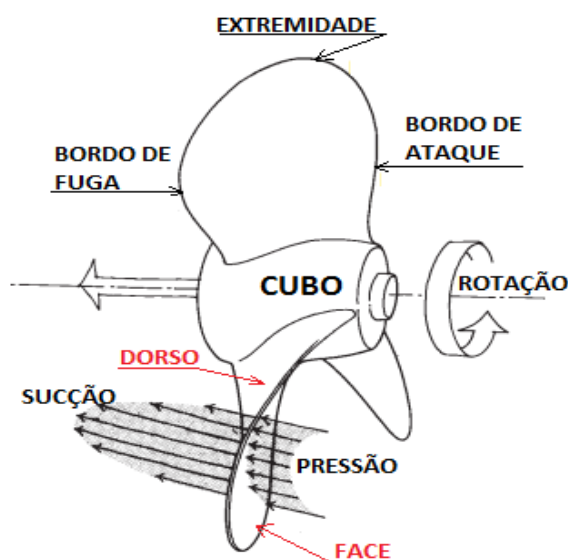


Figura 6 - Nomenclatura de um hélice⁶

⁶ Adaptado: Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*

Na Figura 6 também é possível observar-se que as pás são compostas por 3 arestas designadas por bordo de ataque, bordo de fuga e por extremidade da pá. O bordo de ataque corresponde à linha frontal das pás enquanto, que o bordo de fuga corresponde à linha traseira da pá e a extremidade corresponde ao ponto no qual o raio do hélice é maior. Para se descrever um determinado hélice recorre-se à identificação e sistematização de certas características das quais se destacam: o passo, número de pás, o diâmetro, o perfil das pás, as diferentes áreas do hélice, o *rake* (abatimento axial) e o *skew* (desvio circunferencial) (Campos, 2002)).

1.2.1 Passo

O passo de um hélice é a distância medida ao longo do veio, que corresponde a uma revolução completa de uma pá do hélice. Para se explicar melhor este conceito recorre-se à analogia entre um hélice e um parafuso com o mesmo passo e atuando ambos no mesmo meio sólido como por exemplo a madeira (Volvo Penta, 1998).

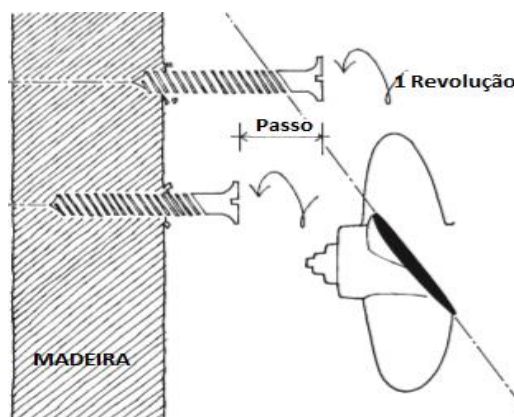


Figura 7 - Analogia entre o passo de um parafuso e um passo de um hélice⁷

Neste caso quando o parafuso executar uma rotação completa, o seu passo vai ser exatamente igual ao seu avanço pois o material não cede à pressão executada pelo parafuso. Sendo assim a velocidade do parafuso pode ser calculada através da seguinte equação,

$$V = p \times n$$

⁷ Adaptado: Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*

Em que:

- V é a velocidade do parafuso ou do navio;
- p é o passo;
- n é o número de rotações.

Um hélice de um navio opera dentro de água tendo este meio um comportamento diferente da madeira e da sua resistência à rotação do parafuso, neste caso a água cede à pressão efetuada pelas pás do hélice provocando assim um avanço inferior ao passo, podendo este efeito ser observado na Figura 8. A diferença entre o passo e o avanço ou a velocidade teórica, tendo em conta o passo do hélice, e a velocidade real do navio designa-se por recuo (Silva, 1953). O recuo é expresso por um coeficiente de recuo o qual representa a percentagem que o hélice não avança após ter executado uma rotação completa. A este coeficiente corresponde a seguinte relação:

$$\frac{p - a}{p} = \frac{V - V'}{V}$$

Equação 2 - Coeficiente de Recuo

Em que:

- V' corresponde à velocidade real;
- a corresponde ao avanço.

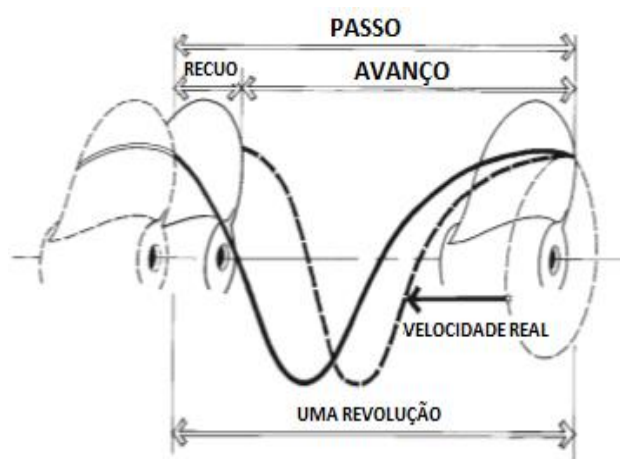


Figura 8 - Representação do Avanço, do passo e do Recuo⁸

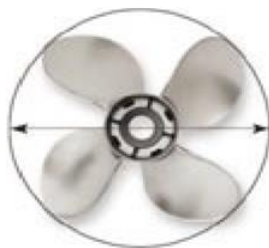
Segundo a empresa Mercury, para se identificar um hélice utiliza-se a nomenclatura 13 $\frac{3}{4}$ X 21, a qual significa que o hélice tem um diâmetro de 13 $\frac{3}{4}$ polegadas (35 cm) e um passo de 21 polegadas (53cm) (Mercury, 2014).

1.2.2 Número de Pás

O número de pás que compõem um hélice tem que ser devidamente estudado pois esta característica depende fortemente das forças assimétricas desenvolvidas pelo hélice quando está animado de movimento. Estas forças provocam uma vibração indesejada no hélice e que por sua vez será propagada ao longo do casco e da instalação propulsora, assim procura-se estabelecer um equilíbrio entre a vibração gerada e o rendimento obtido. Quanto maior for o número de pás menores serão os picos de pressão, o que por sua vez reduz a vibração (Trindade, 2012).

1.2.3 Diâmetro

O diâmetro de um hélice é o diâmetro da circunferência que circunscreve as extremidades das pás. Caso se mantenham as restantes características iguais, o diâmetro aumenta com o aumento da potência e diminui com o aumento da velocidade (RPM's) (Mercury, 2014). O aumento do diâmetro do hélice para uma determinada velocidade de rotação constante, provoca um aumento da quantidade de água que passa através do hélice criando assim uma coluna de água com um volume superior à coluna de água provocada por um hélice com um diâmetro inferior. Este aumento de massa de água deslocado cria uma maior resistência e, para que seja possível manter-se a velocidade, é necessário que o sistema propulsor forneça uma potência superior ao hélice.



⁸ Adaptado: Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*

Figura 9 - Diâmetro do Hélice⁹

1.2.4 Secção das pás

As pás dos hélices têm um perfil aerfoil de modo a que, ao se movimentar na água, o escoamento provoque forças hidrodinâmicas na superfície da pá gerando assim forças para o movimento do navio. A Figura 10 é um exemplo de uma secção de uma pá genérica em que é possível observar-se o bordo de fuga, o bordo de ataque, a corda que corresponde à linha imaginária que une o bordo de fuga ao bordo de ataque, a espessura da pá à qual corresponde a distância entre a face e o dorso da pá, a linha de camber que corresponde à união de todos os pontos médios entre a face e o dorso da pá (Carlton, 2012).

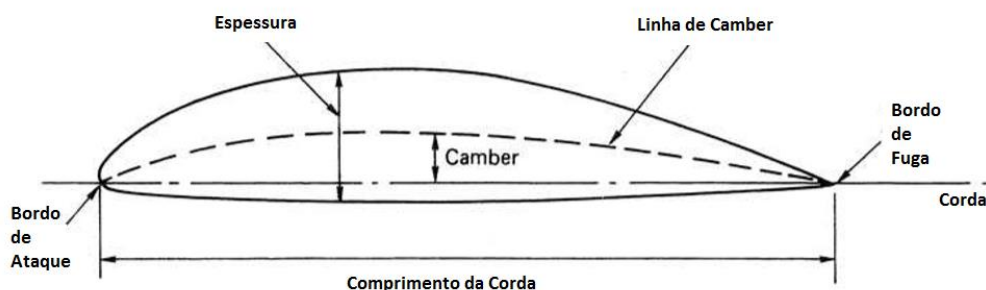


Figura 10 - Secção das pás¹⁰

1.2.5 Áreas das pás

O Blade Area Ratio (BAR) é um conceito que pode ser representado por três relações de áreas das pás que compõem um hélice, as quais são designadas por razão da área projetada (*Projected area ratio* - PAR), razão da área desenvolvida (*Developed area ratio* - DAR) e razão da área expandida (*Expanded area ratio* - EAR). Estas razões relacionam o tamanho do hélice com o seu diâmetro. Estes parâmetros são utilizados para o controlo da cavitação e a alteração destes parâmetros pode provocar alteração na eficiência e na performance do hélice. O PAR é a razão que utiliza a área mais pequena das três que irão ser analisadas, e que é desenhada quando se coloca o hélice numa superfície plana e se desenha os contornos do hélice visto por cima, pela área do disco que corresponde à área do círculo que engloba o hélice. O DAR é a divisão da área que é

⁹ Mercury. (2014). *Propellers: Everything you need to know and more*. Obtido em 15 de Dezembro de 2014, de www.mercurymarine.com.au/

¹⁰ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

determinada pela área da pá caso esta não tivesse sido torcida, por outras palavras, desmontam-se as pás e faz-se com que estas formem passo 0. Posteriormente contorna-se cada pá, calcula-se a sua área e somam-se todas as áreas das pás que compõem o hélice, pela área do disco. O EAR corresponde à razão entre a área expandida, que semelhança da área desenvolvida, somam-se as áreas das pás após se ter desmontado e regressado com o passo a 0, mas na área expandida as secções das pás, em vez de serem curvas, são esticadas de forma a ficarem paralelas umas às outras, e à área do disco (HydroComp, Inc., 2015). É possível fazer uma comparação entre os três tipos de pás na Figura 11.

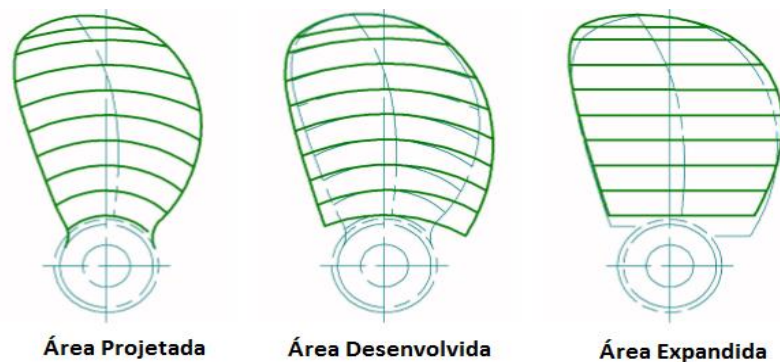


Figura 11 - Áreas Projetada, Desenvolvida e Expandida¹¹

1.2.6 Abatimento axial (Rake)

O abatimento axial é o ângulo, segundo o qual a pá está orientada em relação à perpendicular que passa pelo cubo do hélice, caso este ângulo seja positivo, a pá inclina-se para o final do cubo e sendo este ângulo negativo a pá inclina-se para o lado da embarcação (Barry, 2005).

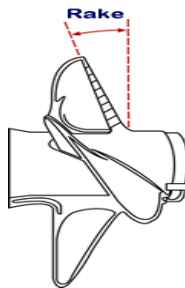


Figura 12 - Abatimento Axial (Rake)¹²

¹¹ HydroComp. (s.d.). *Blade Area Ratio Defined: A hydrocomp technical report, report 135*. Obtido em 11 de Fevereiro de 2015, de hydrocompinc: www.hydrocompinc.com/knowledge/library.htm/

¹² BBlades professional propellers. (s.d.). Props 101. Obtido em 3 de Julho de 2015, de <http://bblades.com/props-101>

1.2.7 Deslocamento circunferencial (Skew)

O principal objetivo de se ter um hélice com deslocamento circunferencial é reduzir os pontos de pressão sobre a pá e diminuir assim a cavitação e o ruído. O abatimento circunferencial grosso modo é “agarrar-se” na pá e “puxá-la” para o lado, sendo possível observar-se este efeito na Figura 13, na qual ambas as pás são idênticas, mas a da direita foi sujeita ao abatimento circunferencial (HydroComp, Inc., 2015).

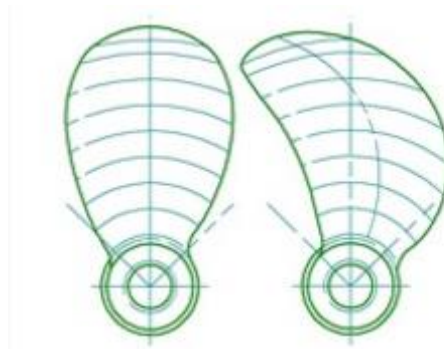


Figura 13 - Efeito do deslocamento circunferencial¹³

1.3 Princípio de funcionamento

Os hélices têm como propósito a criação de propulsão, através do movimento giratório de um conjunto de pás centradas num mesmo ponto. As suas aplicações acontecem, sobretudo, ao nível das aeronaves e navios. Apesar dos diferentes meios de ação, ar e água, os hélices têm muito em comum numa perspetiva teórica. Ambos se assemelham em aspeto e são desenvolvidos de forma a produzirem o máximo de força de propulsão, através da movimentação de fluído desde montante para jusante do hélice. (Barry, 2005)

Os hélices marítimos estão geralmente localizados o mais a ré possível, na popa do navio. Esta escolha tem vários propósitos, tais como, maior eficiência da propulsão, o arranjo das máquinas a bordo e a vulnerabilidade do hélice a danos. Recebem o movimento de rotação do motor propulsor por intermédio de um veio. Esta energia de rotação que é conferida ao hélice é denominada por binário (*Torque*), conforme se verifica na Figura 14, traduzindo-se no movimento rotativo das pás do hélice, o qual proporciona

¹³ HydroComp, Inc. (s.d.). *Evaluating skewed propellers*. Obtido em 13 de Janeiro de 2015, de <http://hydrocompinc.com/knowledge/evaluating-skewed-propellers/>

o movimento do navio. As pás de um hélice ficam, portanto, animadas de velocidade de rotação e avanço. A soma dos vetores da velocidade de rotação e velocidade do navio resultam no vetor da velocidade de escoamento do fluido que atravessa o hélice (*Combined Flow into Prop*). (Barry, 2005)

O hélice está sujeito a um sistema de forças (Figura 14), onde se inclui o binário (Torque) que é transmitido ao hélice e que se traduz por uma força tangencial ao eixo de rotação, aplicada em determinado ponto do hélice com distância ao eixo de rotação. O escoamento do fluído pelo hélice gera uma força denominada por impulsão (*Thrust*), força esta que é caracterizada por apresentar o sentido do escoamento do fluído e ser paralela ao eixo de rotação do hélice. Para obtermos a força total exercida na pá (*Total Force*), temos uma de duas opções: pegar nas duas componentes de força referidas e somá-las vetorialmente, por outro lado, temos também a hipótese de fazer a soma vetorial das forças de sustentação (*Lift*) e arrasto (*Drag*) a que a pá do hélice está sujeita. A força de sustentação toma direção perpendicular à face da pá, e é originada pelas zonas de alta e de baixa pressão. A força de arrasto tem direção paralela à face da pá, sendo a consequência do atrito existente entre a pá e o meio onde se insere (água) (Barry, 2005).

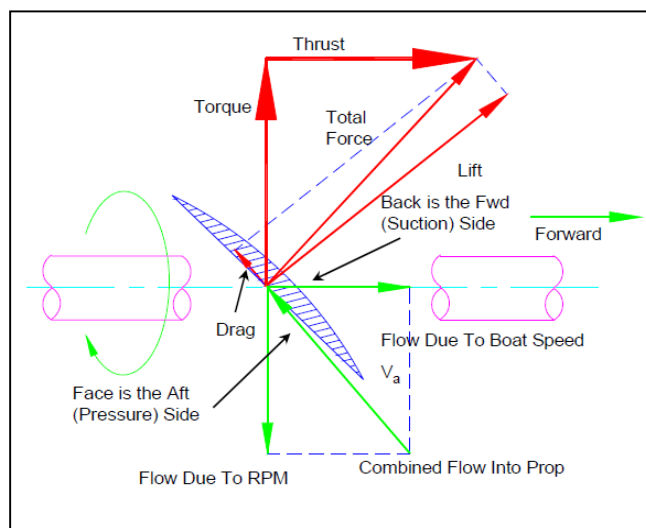


Figura 14 - Sistema de forças que atuam nas pás de um hélice¹⁴

¹⁴ Barry, C. (Fevereiro de 2005). *Propeller Selection For Boats and Small Ships*. Obtido em Abril de 2015, de Davis&Co. Ltd.: https://www.daviscoltd.com/Engineering/documents/PDFs%20Chris%20Barry/Hydrodynamics/Propeller_course.pdf

No entanto, o escoamento do fluido (água) à popa não é uniforme, levando a uma consequência inevitável, a criação de forças de vibração nas pás do hélice e casco. Questões como o número de pás de um hélice e forma do contorno das mesmas são medidas que visam minimizar este fenómeno.

1.4 Cavitação

A cavitação é um fenómeno físico bastante recorrente, ocorre em todo o tipo de equipamentos que durante o seu funcionamento induzam flutuações quer de pressão quer da velocidade do fluído. São exemplos as turbinas, bombas, hélices, rolamentos, entre outros, sendo a cavitação um fenómeno com consequências nefastas nestes equipamentos (Carlton, 2012).

O estudo deste fenómeno físico remonta a meados do século dezoito, quando Euler, um matemático suíço, apresentou um estudo na Berlin Academy of Science and Arts onde fazia referência que um determinado design de uma azenha, ou moinho de água, influenciava o desempenho do mesmo. No entanto, e virando o foco para a indústria marítima, só no século dezanove foram feitos progressos e foi associado este complexo fenómeno ao desempenho de um hélice, estudo que foi introduzido por Reynolds.

Charles Parsons foi quem deu início à investigação para se descobrir a origem deste fenómeno através de testes em tanque. Atualmente existem diversos centros de investigação nos mais diversos cantos do mundo (Carlton, 2012).

1.4.1 Princípio físico

Em termos físicos, a origem deste fenómeno está relacionada com a formação de regiões de baixa pressão associadas à alta velocidade do escoamento de água pelo hélice, fenómeno facilmente perceptível recorrendo ao teorema de Bernoulli, donde se deduz que um aumento da velocidade de escoamento resulta numa redução da pressão. É neste aspeto que a cavitação se distingue da ebulição, a mudança de fase não é resultado do aumento de temperatura por fornecimento de calor, mas sim, resultado da queda repentina de pressão, distinguindo-se por ser um fenómeno aproximadamente isotérmico. As quedas repentinas de pressão referidas são críticas quando caem abaixo do valor de pressão mínima à qual ocorre a vaporização do fluído, no caso dos hélices marítimos,

quando atingem uma pressão menor à mínima de vaporização da água, a qual é função da temperatura da mesma (Figura 15).

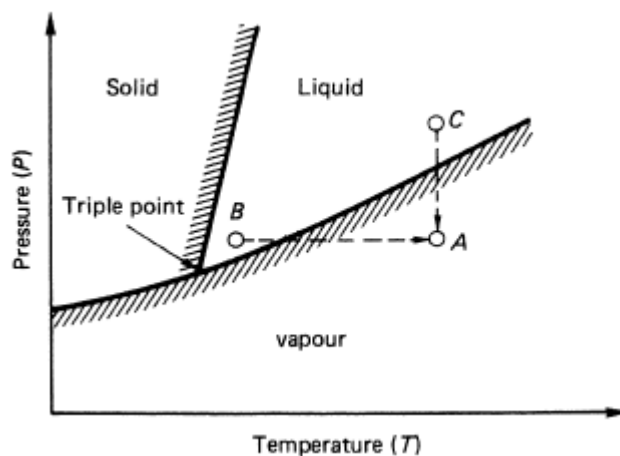


Figura 15 - Diagrama de fases da água¹⁵

Se tal ocorrer, formar-se-ão cavidades preenchidas com vapor, comumente designadas como bolhas de vapor, que desaparecem sob a forma de implosão quando sujeitas a um aumento de pressão (Figura 16) (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

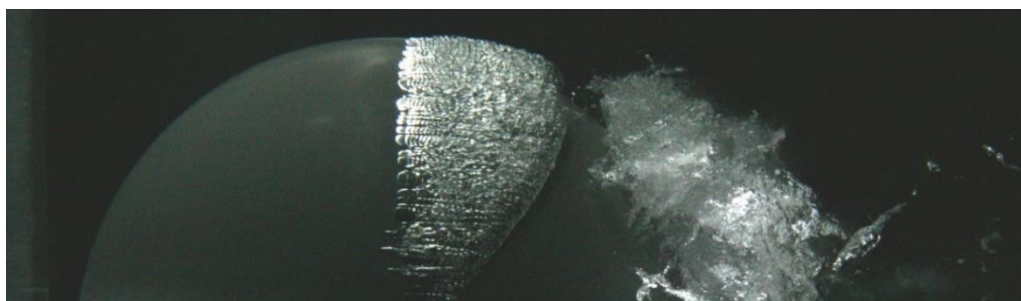


Figura 16 - Formação de bolhas de vapor¹⁶

A cavitação é um agregado de fenómenos bastante complexos, porque em torno do hélice tem-se o escoamento da água em duas fases: líquida e vapor, os quais não são linearmente modeláveis. O que tipicamente se observa é que, dependendo da posição de determinada pá do hélice numa rotação completa, esta alternadamente passará por regiões

¹⁵ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

¹⁶ Brandner, P. (s.d.). *University of Tasmania*. Obtido em 15 de Fevereiro de 2015, de <https://www.amc.edu.au/news/postgraduate-opportunities-cavitation-research>

onde as condições permitem a formação das bolhas e outras onde estas colapsam. Sendo do senso comum, e rapidamente perceptível, que devido à pressão hidrostática, tendencialmente na zona de máxima imersão, a pressão total será superior e, na posição de menor imersão, a pressão total será inferior, gerando um diferencial de pressão que poderá permitir a ocorrência e colapso das bolhas durante uma rotação do hélice.

Idealmente a água transita de estado, como já mencionado, num ponto em que a pressão total atinge um valor menor à da pressão de vapor a essa temperatura, uma relação bastante simples mas que, no entanto, apenas se aplica a água sem impurezas ou ar dissolvido. Na prática, a água contém ar dissolvido e partículas microscópicas na sua solução, o que permite que o fenómeno de cavitação ocorra mais facilmente, invalidando a sua ocorrência exclusivamente quando obtida a simples relação de pressões.

Para efeitos de cálculo da probabilidade de ocorrência do fenómeno de cavitação em determinado escoamento, recorre-se ao número de cavitação σ , parâmetro adimensional, que se obtém através da equação:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$$

Equação 3 - Número de Cavitação

Onde:

- P_o é a pressão não perturbada;
- P_v é a pressão de vapor à temperatura ambiente de referência;
- ρ é a massa específica do fluído;
- nD é a velocidade característica, onde n representa as rotações por segundo e D o diâmetro do hélice.

Enquanto se verificar que σ é inferior a σ_v , sendo σ_v o número de cavitação correspondente para a pressão de vapor, o fenómeno de cavitação não ocorrerá, considerando um fluido ideal. Esta abordagem permite uma análise generalista, sendo que em casos práticos, deve-se considerar uma pressão limite ligeiramente superior à pressão de vapor, aplicando-se um fator de segurança apropriado (Trindade, 2012).

Existem diversos tipos de cavitação que poderão ocorrer num hélice, dos quais se destacam (Figura 17):

- Cavitação de bolha;
- Cavitação de bolsa;

- Cavitação na raiz da pá;
- Cavitação de vórtice de extremidade;
- Cavitação de vórtice entre o hélice e a querena;

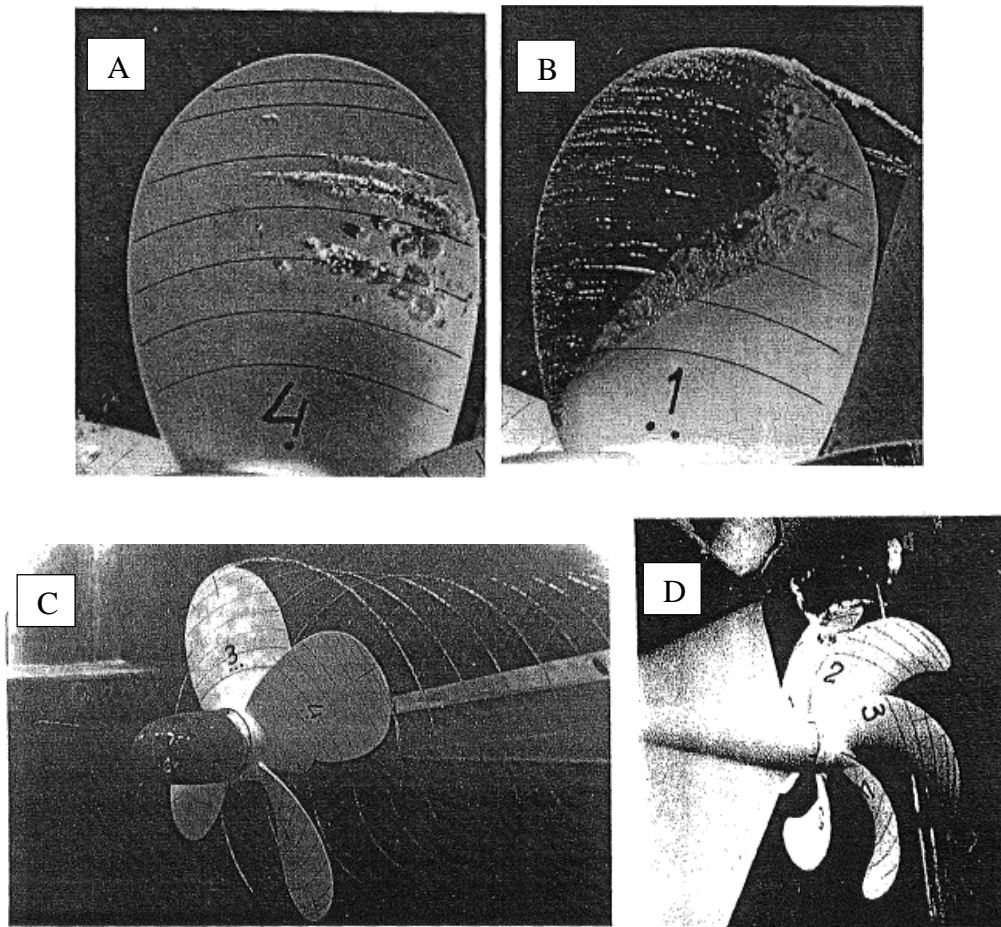


Figura 17 - Tipos de cavitação: (A) cavitação de bolha; (B) cavitação de bolsa; (C) Cavitação de vórtice de extremidade; (D) Cavitação de Vórtice entre o hélice e a querena¹⁷.

O colapso destas bolhas provocam efeitos prejudiciais sob a superfície com que contactam, dos quais se destacam:

- Ruído;
- Vibrações;
- Erosão da superfície das pás;
- Perda de força propulsiva (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

1.4.2 Ruído

A radiação de ruído ocorre porque no colapso das bolhas de vapor formadas no fenómeno de cavitação, são produzidas ondas de choque que apresentam um ruído

¹⁷ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

característico e bastante ensurdecidor. O ruído emitido abrange frequências altas, característica do fenómeno de cavitação e praticamente singular num navio, no entanto também emite ruído em frequências baixas, contribuindo juntamente com equipamentos tais como o motor, escoamento, rotação do hélice, entre outras (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

1.4.3 Erosão

A erosão ocorre devido a dois processos distintos associados ao colapsar das bolhas de vapor, o microjato e as ondas de choque.

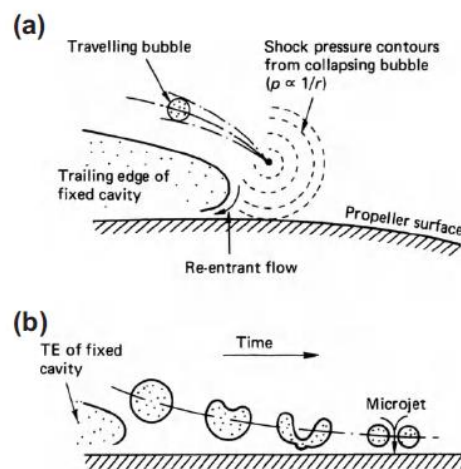


Figura 18 - Processos de erosão: (a) onda de choque; (b) microjato¹⁸.

O microjato ocorre na fase final do colapso das bolhas, quando estas deixam de assumir a sua típica forma esférica dando lugar a este mecanismo físico de microjato na direção da superfície das pás do hélice. As consequências do impacto do microjato sobre a superfície são o aparecimento de pequenos orifícios (“pits”) na superfície. As ondas de choque são de idêntica atuação, à semelhança do microjato, ocorrem igualmente na fase final do colapso das bolhas, devido à velocidade da parede da cavidade ser substancialmente superior à do som, provocando a erosão da superfície das pás do hélice (Figura 18) (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

¹⁸ Universidade Técnica de Lisboa. (2002). Resistência e Propulsão. (Apontamentos teóricos). Lisboa.



Figura 19 - Consequências da cavitação, “pitting” e erosão do hélice¹⁹.

1.4.4 Vibrações

As vibrações são geralmente uma consequência da cavitação de bolsa. As bolsas de cavitação presentes nas pás estão preenchidas com um grande volume de vapor, o qual varia consideravelmente no percurso de revolução da pá. O dinamismo destas variações provoca grandes flutuações de pressão à frequência da pá e aos seus múltiplos, frequências essas, abaixo das audíveis. As flutuações de pressão apresentam um grande comprimento de onda, maior que a distância ao casco, refletindo-se num comportamento do fluido como incompressível e flutuações de pressão em fase com a pressão na cavidade. A fase constante das flutuações de pressão gera efetivamente vibrações no casco do navio, no entanto, a própria passagem da pá gera também flutuação de pressão que também contribui para o efeito, sendo mais notável na ocorrência de cavitação no hélice (Figura 20) (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

¹⁹ National Park Service. (s.d.). Obtido em 25 de Fevereiro de 2015, de www.nps.gov/safr/learn/historyculture/propsaquaticpark.htm

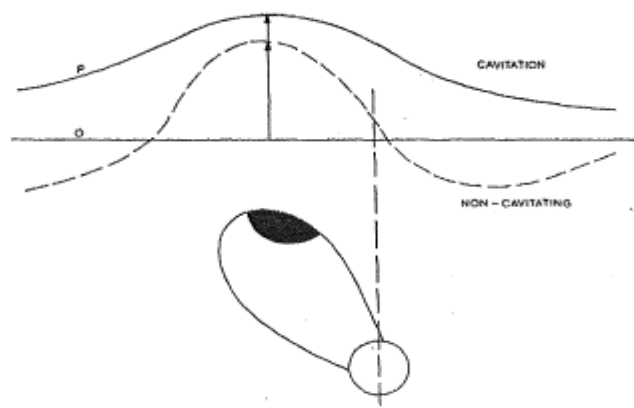


Figura 20 - Flutuação de pressão devido à passagem do hélice com cavitação e sem cavitação²⁰

1.4.5 Perda de força propulsiva

A perda de força propulsiva é mais significativa quando o fenómeno de cavitação ocupa uma boa parte das pás do hélice, entre 20% e 25% de cada pá. Isto irá refletir-se numa perda de impulso e binário que o hélice poderá entregar. A perda de impulso é mais significativa do que a perda de binário, no entanto, são consequências que se opõem ao funcionamento eficiente de um hélice. Outro dos fatores que influencia a perda de força propulsiva, é a velocidade rotacional do hélice, caso esta apresente grandes valores poderá intensificar a perda de eficiência do hélice (Universidade Técnica de Lisboa, 2002).

1.4.6 Considerações geométricas

Tem-se feito um grande esforço na matéria da cavitação, no sentido de minorar o aparecimento deste fenómeno e suas consequências. No que concerne ao fenómeno de cavitação, é sabido que é predominantemente influenciado pelo campo de pressão gerado no plano do hélice. A sua prevenção terá que passar obrigatoriamente pelo controlo da pressão mínima absoluta naquele escoamento, para que não se estabeleçam as condições necessárias para a formação das bolhas de cavitação. Em termos geométricos tipicamente opta-se por soluções que permitam uma distribuição da força propulsiva por uma área maior, tais como, aumentar o diâmetro do hélice ou a razão da área expandida (A_E/A_0) (Trindade, 2012).

²⁰ Universidade Técnica de Lisboa. (2002). Resistência e Propulsão. (Apontamentos teóricos). Lisboa.

Existem também soluções para estimar a possibilidade de ocorrência de cavitação, tal como a utilização do diagrama de Burril (Figura 21), ainda que não sejam métodos muito rigorosos, são uma referência.

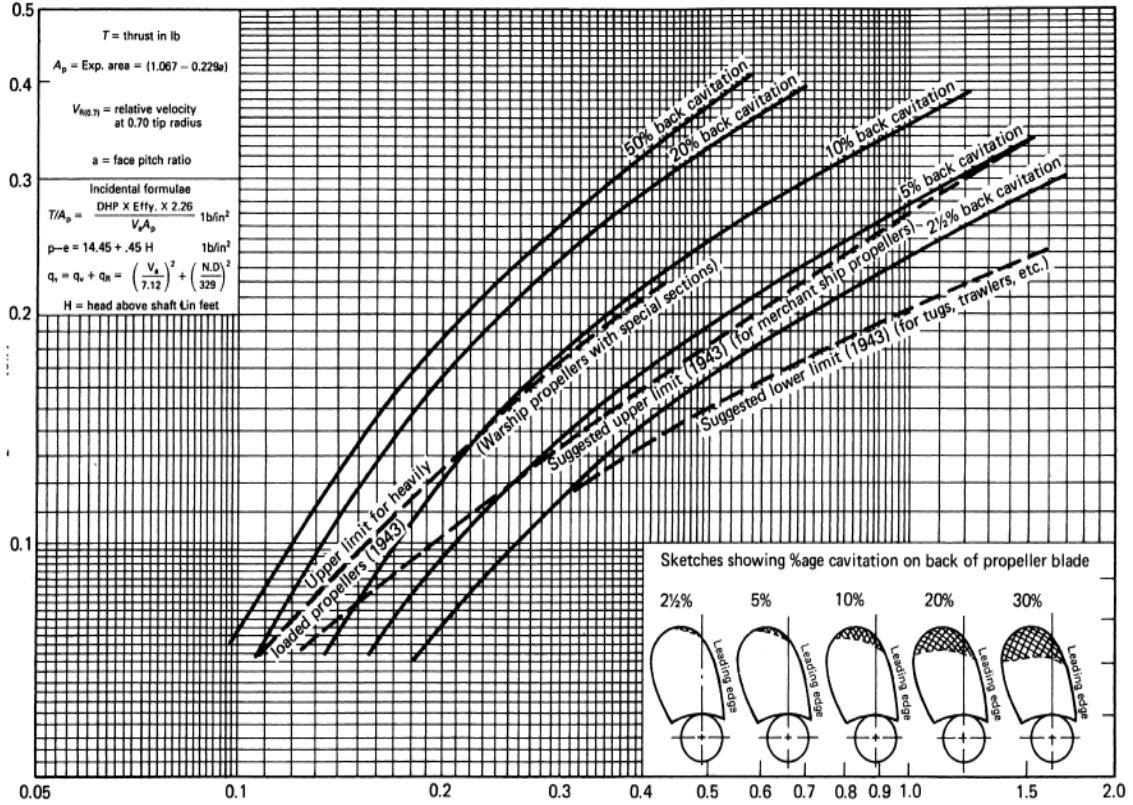


Figura 21 - Diagrama de Burril para escoamento uniforme²¹

O diagrama de Burril tem representado nos eixos das abcissas o número de cavitação e, nas ordenadas, o coeficiente de Burril. São sugeridos diversos limites para a área projetada do hélice, quer de navios mercantes, rebocadores e de guerra, entre outros, que permita prevenir o fenómeno de cavitação. Existem também alguns limites que admitem a ocorrência de cavitação, em determinada percentagem, a qual reflete a área afetada pelo fenómeno de cavitação relativamente à área da pá do hélice.

O coeficiente de Burril é calculado da seguinte forma:

$$\tau_c = \frac{T}{q_{0,7R} \cdot A_p}$$

Equação 4 - Coeficiente de Burril

²¹ Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

Onde, T representa o impulso, A_p é a área projetada do hélice e o parâmetro o parâmetro $q_{0,7R}$ é dado por:

$$q_{0,7R} = \frac{1}{2} \rho V_R^2$$

Equação 5 - Cálculo do parâmetro $q_{0,7R}$

em que V_R é o valor absoluto da velocidade local a 0,7 do raio do hélice:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi nD)^2}$$

Equação 6 - Velocidade local a 70% do raio do hélice

onde V_a é a velocidade de entrada do escoamento no plano do hélice.

1.5 Projeto de Hélices

1.5.1 Teoria do disco atuador e elementos de pá

No projeto de hélices são utilizadas duas teorias independentes, uma delas é a teoria do disco atuador (ou teoria da quantidade de movimento) e a outra é a teoria dos elementos de pá.

A teoria do Disco Atuador, foi proposta por *Rankine* em 1865 e concluída por *Froude* em 1887. Esta teoria, vê o hélice como um mecanismo que permite a aceleração do fluido onde opera (ar, água), absorvendo a geração das forças nas pás do hélice que permitem esse fenómeno. Os pressupostos associados a esta teoria são:

- Escoamento de fluido ideal (não viscoso e incompressível) e permanente;
- O hélice é considerado como um disco infinitamente fino, ou seja, uma descontinuidade plana;
- Escoamento limitado pelas linhas de corte.

A falta de informação sobre a forma do hélice é a principal limitação desta teoria, pois embora bem fundamentada, só permite determinar a propulsão resultante da variação de velocidade aquando a passagem pelo hélice, nas condições descritas anteriormente, de determinado caudal mássico de fluido (Figura 22), impossibilitando assim o projeto de hélices. É também relevante mencionar que esta teoria não tem em linha de conta o arrasto (Carlton, 2012) (Trindade, 2012).

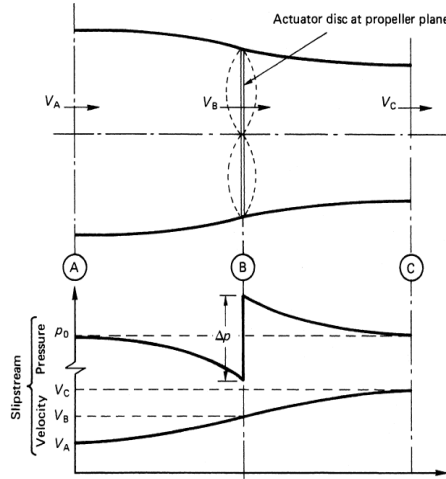


Figura 22 - Variáveis implícitas na teoria do Disco Atuador²²

O cálculo do impulso gerado (T) é calculado recorrendo ao caudal mássico (\dot{m}) que flui através do disco:

$$T = \dot{m}(V_C - V_A)$$

Equação 7 - Cálculo do impulso gerado

A potência fornecida pelo disco (P_D) é, aplicando a equação de *Bernoulli*¹, obtida através do aumento em energia cinética do escoamento do fluido:

$$P_D = \left(\frac{\dot{m}}{2}\right)(V_C^2 - V_A^2)$$

Equação 8 - Potência fornecida pelo disco

O rendimento ideal do hélice propulsor (η_i) é calculado recorrendo à perda de energia cinética axial por unidade de tempo (\dot{E}_p) e à potência efetiva do hélice (P_E):

$$\eta_i = \frac{\text{Potência de impulso}}{\text{Potência fornecida}} = \frac{P_E}{P_E + \dot{E}_p} = \frac{1}{1 + \dot{E}_p}$$

Equação 9 - Rendimento ideal do hélice

Por outro lado, surge a teoria dos elementos de pá, de *W. Froude*, que procura explicar o mecanismo de produção de forças nas pás do hélice. Para tal, recorre ao seccionamento das pás do hélice, seguido pela análise das forças de sustentação e arrasto

²² Carlton, J. S. (2012). Marine Propellers and Propulsion (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

envolvidas nessas secções e, por fim, integra-se as forças previamente determinadas ao longo do raio do hélice (Figura 23) (Carlton, 2012).

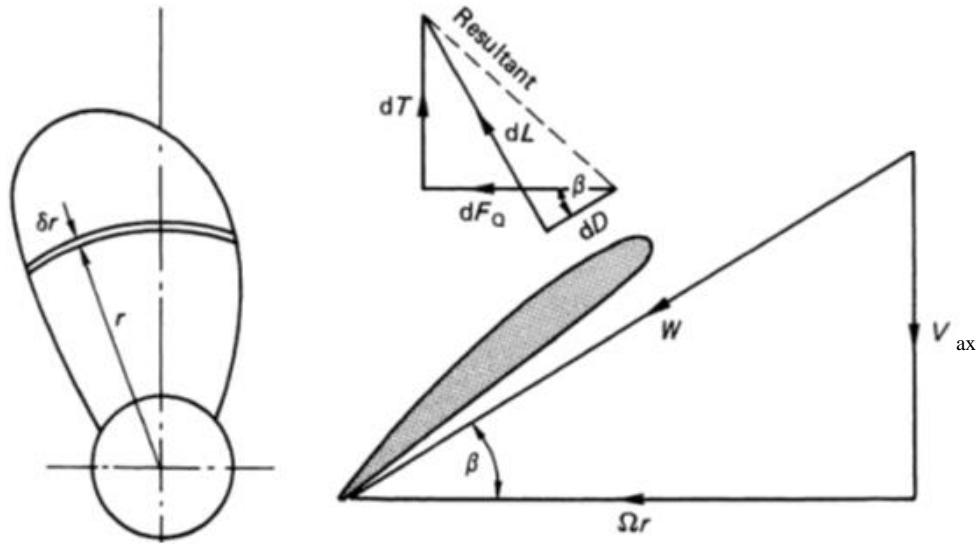


Figura 23 - Esquematização das variáveis envolvidas ²³

Na Figura 23 estão representadas as variáveis que mais importam no seccionamento da pá do hélice, segundo esta teoria, onde:

- dT Impulso
- dF_Q Binário
- dL Sustentação
- dD Arrasto
- V_{ax} Velocidade axial
- Ωr Velocidade rotacional
- β Ângulo ente as duas componentes de velocidade

Pode-se deduzir, portanto, que o impulso e torque são obtidos através das fórmulas:

$$dT = \frac{1}{2} \rho Z c W^2 (c_l \cos \beta - c_d \sin \beta) dr$$

Equação 10 - Cálculo do impulso gerado

$$dQ = \frac{1}{2} \rho Z c W^2 (c_l \sin \beta + c_d \cos \beta) r dr$$

Equação 11 - Cálculo do binário gerado

²³ Carlton, J. S. (2012). Marine Propellers and Propulsion (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

$$\eta = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta + \gamma)}$$

Equação 12 - Rendimento do hélice

Onde c_l , c_d , representam, respetivamente, o coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto, Z e c representam o número de pás e comprimento da corda, r é raio, ρ a densidade e $\gamma = \frac{c_d}{c_l}$ (Carlton, 2012). Infelizmente esta teoria assenta no pressuposto que cada elemento da pá será responsável pela aplicação da força que gerará a mudança na quantidade de movimento do fluido varrido neste, sem considerar as interações radiais existentes entre os escoamentos em cada secção. Portanto, esta teoria assume que o escoamento axial é uniforme.

É por este motivo que surgiu a necessidade de combinar as duas teorias mencionadas, passando a denominar-se teoria da quantidade de movimento do elemento da pá. Recorrendo à teoria do disco atuador é possível calcular as interações radiais do escoamento nas direções axial e tangencial ao mesmo (Alves, 2011).

1.5.2 Teoria da linha de sustentação e superfície sustentadora.

Face aos progressos computacionais e todo o potencial associado a esta evolução, foi possível o desenvolvimento e aplicação das teorias da linha de sustentação e superfície sustentadora. De uma forma mais generalista, cada pá do hélice é representada, na teoria da linha de sustentação, por uma linha de vórtices de circulação, ao longo do raio do hélice, enquanto a teoria da superfície de sustentação representa a pá como uma superfície de vórtices, o que permite a obtenção de um modelo tridimensional.

A teoria da linha de sustentação, introduzida por Prandtl, e posteriormente por ele desenvolvida, assume que a pá do hélice é seccionada e retratada por uma linha de vórtices, cuja intensidade varia entre secções. A linha é contínua na direção radial da pá, esta linha é afetada por vórtices e assume-se que esta passa, geralmente, através do centro aerodinâmico das secções (Figura 24).

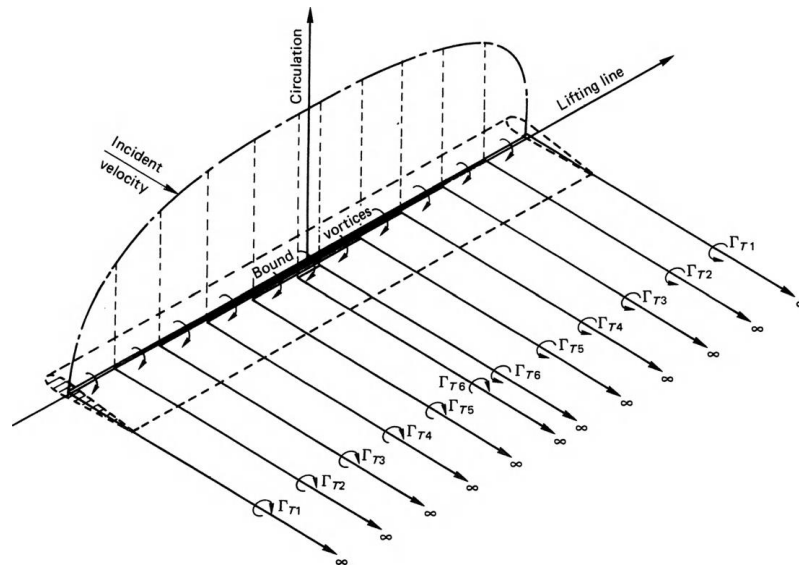


Figura 24 - Teoria clássica da linha sustentadora de Prandtl²⁴

Numa determinada secção, a geometria de um hélice, segundo esta teoria, poderá ser representada por um único ponto, tal como se pode verificar na Figura 25(a).

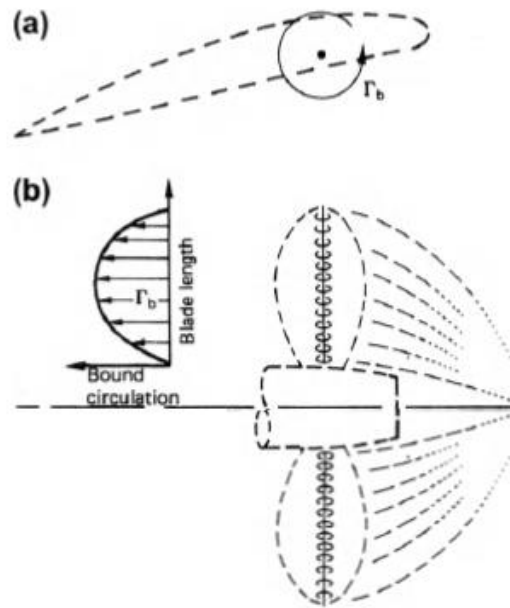


Figura 25 - Linha de sustentação (a); Ação do hélice descrito por linha de sustentação (b)²⁵

Como já referido, a intensidade dos vórtices (Γ_b) varia na direção radial, tal como demonstrado no gráfico da Figura 25 (b). Integrando a intensidade dos vórtices ao longo

²⁴ Carlton, J. S. (2012). Marine Propellers and Propulsion (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

²⁵ Adaptado: Carlton, J. S. (2012). Marine Propellers and Propulsion (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.

da linha de sustentação e tendo em conta a velocidade do fluido (V_∞) que percorre as pás do hélice, assim como a sua densidade, obtemos o total das forças aplicadas. Este valor obtido corresponde à força de sustentação gerada, segundo o teorema Kutta-Joukowski:

$$L \approx \rho \times V_\infty \times \int_0^y \Gamma b(y) dy$$

Equação 13 - Força de sustentação gerada

A teoria da linha de sustentação contudo, apesar de simples, tem uma fraca adequabilidade aos hélices marítimos, é mais apropriada para hélices de aeronaves. Esta teoria permite obter uma representação da pá muito mais detalhada comparativamente à obtida segundo a teoria da superfície sustentadora. Nesta teoria, a pá é representada por uma superfície de vórtices infinitamente fina, que refletem as propriedades de impulso gerado por determinado perfil de pá; esta superfície acompanha a curvatura da pá, assumindo a distribuição de vórtices presente nesta, as direções do raio e envergadura do hélice (Figura 26).

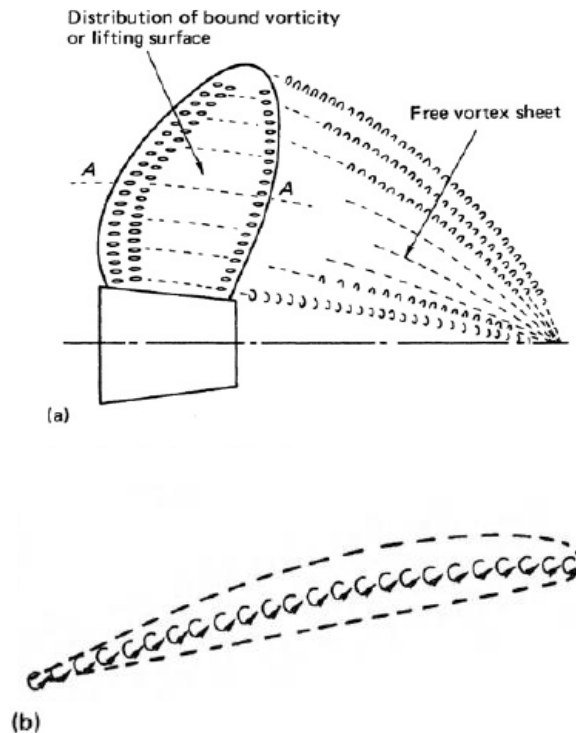


Figura 26 - Distribuição dos vórtices na pá (a); Superfície de vórtices representativos da pá de perfil (b)²⁶

²⁶ Carlton, J. S. (2012). Marine Propellers and Propulsion (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier

Futuros desenvolvimentos desta teoria permitiram criar modelos onde é possível a predição da ocorrência de cavitação nos hélices. Para tal, foi introduzida a distribuição de correntes de entrada e saída em determinados pontos ao longo do perfil da pá, acompanhando o mesmo (Figura 27). Esta distribuição permite determinar a espessura do hélice seccionalmente, de modo a estimar-se de forma mais acertada a distribuição de pressões ao longo da superfície do mesmo, a qual será um elemento chave à predição do fenómeno de cavitação.

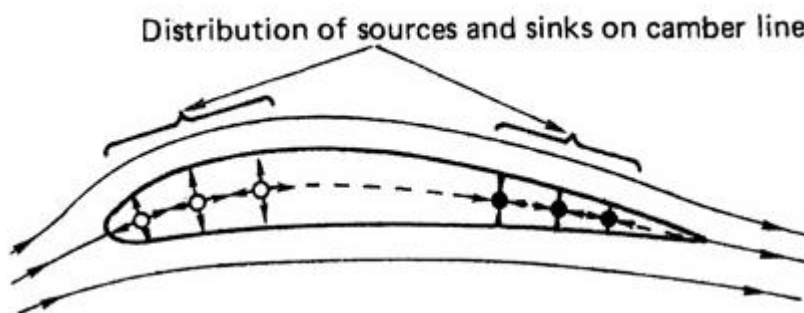


Figura 27 - Distribuição de correntes de entrada e saída ao longo do perfil da pá²⁷

Naturalmente, criar um modelo por via desta teoria torna-se muito mais difícil devido à complexidade de cálculo envolvido na mesma.

1.5.3 Séries sistemáticas de hélices

A utilização de séries sistemáticas de hélices teve e tem uma ampla aplicação. As séries são obtidas através dos testes efetuados a um conjunto de hélices, onde se faz variar alguns aspetos geométricos, criando assim curvas características de cada hélice. A base de dados gerada permite auxiliar o projetista na identificação dos fatores mais preponderantes para uma eficiente operação do hélice nas mais diversas situações e, mais significantes para a ocorrência do fenómeno de cavitação. São também uma ótima fonte de informação na seleção das características mais convenientes do hélice para o propósito a que se propõe o navio em termos do que serão as suas funções (Kuiper, 1992).

Em 1936, van Lammeren publicou os resultados dos testes efetuados por si, a cinco hélices de quatro pás em tanque de ensaio, variando o seu passo sistematicamente.

²⁷ Molland, A. F. (Ed.). (2008). The Maritime Engineering Reference Book: A guide to ship design, construction and operation. (1ª ed.). Reino Unido: Elsevier.

Esta série foi apelidada A4.40, onde o 4 indica o número de pás, o 40 a razão da área expandida (neste caso 0.4) e o “A” simplesmente designa o facto de esta ser a primeira série, apontando para o continuar deste trabalho e promovendo futuros desenvolvimentos. As pás dos hélices em questão, da série A, apresentavam já um perfil “moderno”, comparativamente aos perfis mais comuns da altura. A ponta dos hélices era bastante abicada, o que, em conjunto com outras características dos hélices desta série, os tornava suscetíveis a cavitação. Houve, portanto, a necessidade de criar uma nova série onde estes problemas fossem resolvidos, tendo-se chegado então à série B de Wageningen. Noventa modelos de hélices foram utilizados para elaborar esta série, modelos estes que já haviam sido estudados e investigados na NSMB (Netherland Ship Model Basin). Estes hélices apresentavam uma ponta muito mais larga, assim como ajustes no contorno das pás e outros, para melhorar o comportamento à cavitação do hélice. Futuramente criou-se também a série C, criada com um conjunto de sete hélices com uma relação potência-rotação constante.

As séries mais comuns são as de Wageningen (Figura 28), as AEW e as de Gawn, sendo a mais popular a série B de Wageningen, que tem como principais características as seguintes:

- Distribuição radial do passo constante;
- Pequeno deslocamento circunferencial;
- Distribuição radial do abatimento axial linear 15° ;
- Contorno largo da pá na ponta;
- Secção das pás NSMB, tal como se pode verificar na Figura 28;
- Entre 2 a 7 pás;
- Razão de área expandida entre 0.3 a 1.05;
- Razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4.

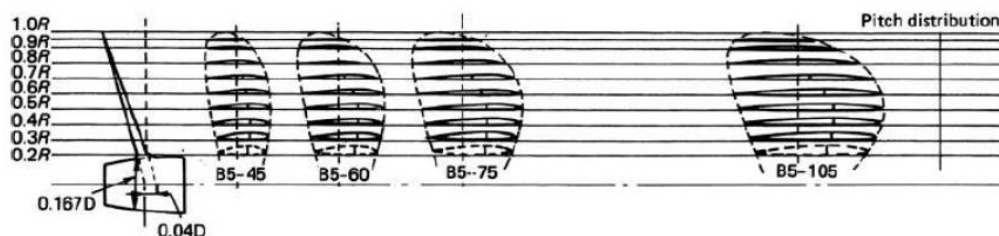


Figura 28 - Aspeto geométrico das pás da série B de Wageningen ²⁸

²⁸ Trindade, J. (2012). Hidrodinâmica e Propulsão.

O emprego destas séries é relativamente simples, através de coeficientes polinomiais podemos obter as especificações de um hélice, recorrendo aos diagramas com as curvas características de águas livres para cada caso e diferentes razões passo-diâmetro (Figura 29). A principal desvantagem na utilização das séries é que não há espaço a inovação, uma vez que, a geometria base do hélice já se encontra estabelecida (Trindade, 2012).

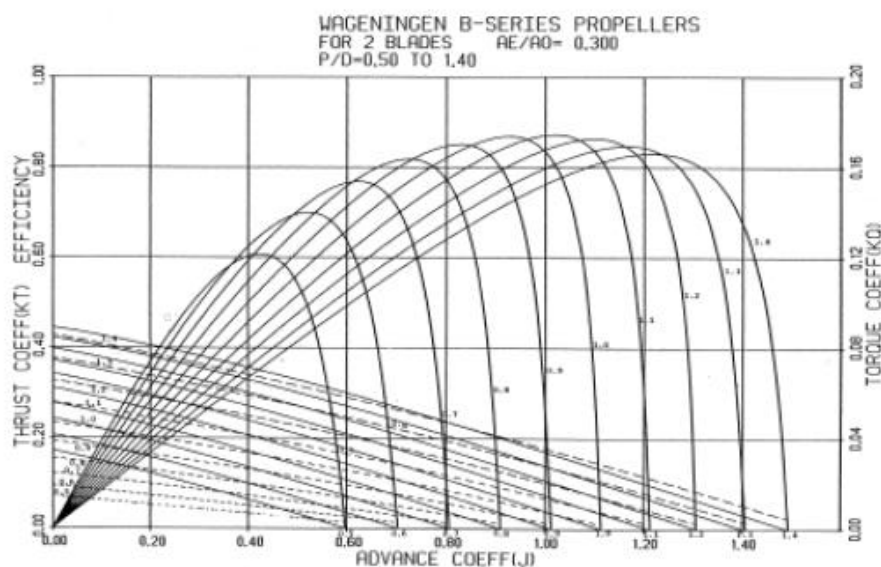


Figura 29 - Série B de Wageningen para hélices de duas pás, razão de área expandida 0.3 e razão passo-diâmetro entre 0.5 a 1.4²⁹.

1.5.4 Computational Fluid Dynamics Analysis (CFD)

Recentemente assistimos a consideráveis avanços nas aplicações relacionadas com a análise e projeto de hélices, designadamente hélices marítimos, recorrendo à análise dinâmica de fluidos por computador, os chamados CFDs (Carlton, 2012).

A vertente com a mais ampla aplicação é a de análise dos hélices, donde se retiram informações relativamente ao comportamento dos mesmos à cavitação e ao escoamento viscoso. As questões referentes ao projeto de hélices são, no entanto, mais particulares e de mais difícil resposta, considerando-se que ainda não estamos ao nível de estes métodos serem dignos de aceitação geral, sendo contudo, inevitável o seu sucesso num futuro próximo (Carlton, 2012).

²⁹ Trindade, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.

Apesar de algumas dificuldades na aplicação de métodos de análise de escoamento de fluidos por computador, para efeitos de descrição do comportamento hidrodinâmico do hélice, existe um trabalho contínuo nesta área, que tem demonstrado o ultrapassar de inúmeras barreiras e o ganho de maturidade nesta matéria. Uma das questões essenciais que esta abordagem permite, é transmitir a perceção do comportamento do hélice em grande pormenor, reunindo todas as forças envolvidas no mesmo, onde estão aplicadas, fatores que as influenciam, questões onde as técnicas clássicas já mencionadas e as demais existentes, simplesmente não se aplicam. Portanto, o projeto de hélices recorrendo a simulações de computador, é uma realidade atualmente tangível, que sofre alterações e mudanças constantes, tem a desvantagem de possuir ainda algumas lacunas pela dificuldade de codificar todos os fenómenos associados à interação do hélice com o fluido onde se encontra, e de correlacioná-los (Carlton, 2012).

1.5.5 “*Surrogate Modeling*”: Uma alternativa na modelação

Inúmeras áreas científicas e de engenharia deparam-se com uma necessidade preponderante na aposta em simulações computacionais, que permitam entender determinados eventos ou na resolução de intrincados problemas de *design*. A criação de simulações computacionais capazes de auxiliar nesta problemática tem sofrido grande adesão, no entanto, determinados problemas exigem simulações altamente fiáveis e complexas, cujo custo poderá não ser muitas das vezes suportado. Portanto, é totalmente compreensível a aposta no uso de redes neuronais, métodos de kernel, assim como outras formas enquadradas dentro daquilo a que se chama “*Surrogate modeling*”. São abordagens acima de tudo bastante acessíveis economicamente e relativamente simples de utilizar. Têm dado frutos em algumas tarefas, nomeadamente na otimização de *design* e criação de protótipos, motivo pelo qual seja uma ferramenta perfeitamente sensata para resolver a problemática da modelação de hélices (Koziel, Ciaurri, & Leifsson, 2011).

Tipicamente, e até à atualidade, a modelação de um hélice tem por base conceitos físicos bastante complexos. É um procedimento extenuante, dispendioso e demorado, tudo fatores motivadores na procura de formas de alternativas de modelação, é nesta perspetiva que surge o “*Surrogate Modeling*”.

A busca de métodos alternativos na modelação de hélices atinge o seu expoente máximo na atualidade, fazendo, para o efeito, uso das possibilidades computacionais

acrescidas dos dias de hoje. A modelação de hélices é facilitada pela possibilidade de simulações computacionais, numa área cuja aplicação ainda não se encontra perfeitamente proliferada, mas que no entanto simplificariam significativamente a realização da mesma. O “*Surrogate Modeling*” é justamente uma metodologia que assenta nos meios de análise computacional para modelação. Distingue-se pela criação de modelos, que têm por base a análise de dados multivariados, na perspetiva da relação entrada/saída dos mesmos. Esta relação é utilizada como forma de aprendizagem comportamental, permitindo criar um modelo que correlacione determinadas condições de entrada com os efeitos de saída da mesma. A abordagem por “*Surrogate Modeling*” exige uma grande base de dados, relativos a provas realizadas em diferentes condições. Quanto maior o volume de dados, maior será a exatidão desta metodologia, uma vez que, o que esta realiza de forma genérica, é uma aprendizagem supervisionada a partir de bases de dados. Pode-se dizer que é um método autodidata, executando interpolação não-linear entre os dados (Kozziel, Ciaurri, & Leifsson, 2011).

O que se pretende, com as provas que terão de ser efetuadas, é que estas sejam realizadas mediante determinadas condições de entrada, com diversas respostas associadas às mesmas. A análise que esta metodologia fará, tem por base a aprendizagem pela observação dos efeitos nas alterações das condições de entrada. Esse estudo, permitirá obter uma previsão estimada, de quais são as condições de entrada que trarão o efeito desejado, ou mais proveitoso.

2. Motores de combustão interna

2.1 Motores Fora de Borda

Em termos gerais os motores fora de borda são constituídos por um motor de combustão interna disposto na vertical e por uma coluna. Os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia proveniente da explosão dos gases de combustão em energia mecânica. Estes motores podem ser de explosão de dois ou quatro tempos ou de combustão a quatro tempos.

Para a transmissão do movimento de rotação do motor para o hélice, a coluna é constituída por um veio de transmissão que recebe o movimento proveniente do motor e que o transmite para o rotor da bomba de água e para a caixa de engrenagens que são responsáveis pelo movimento do veio propulsor e que por sua vez movimenta o hélice. A caixa de engrenagens, o veio propulsor e o hélice localizam-se na parte inferior da coluna.

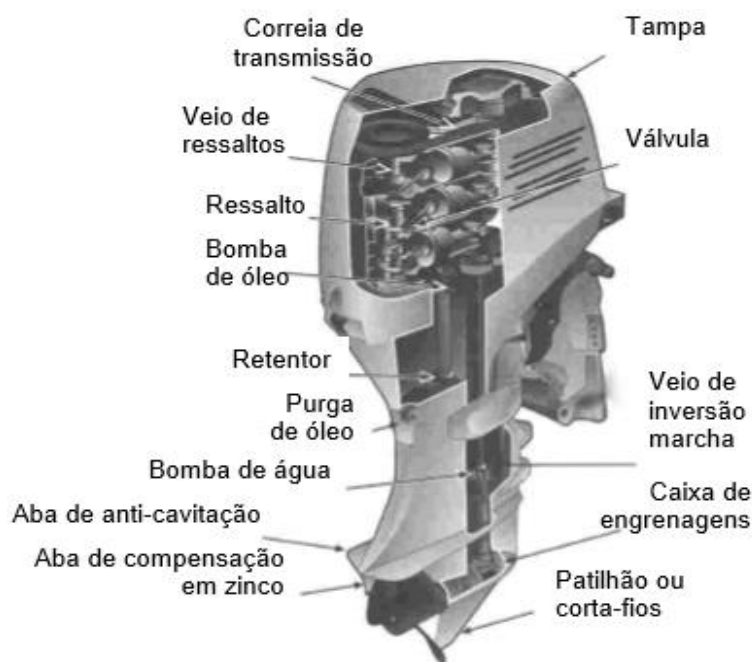


Figura 30 - Constituição de um motor fora de borda a quatro tempos³⁰

Nos motores de explosão a quatro tempos o combustível mais utilizado é a gasolina e os quatro tempos do seu ciclo operativo são em primeiro lugar a admissão,

³⁰ Escolas de Tecnologias Navais. (2010). PEETNA2016 - Sistemas de Aperfeiçoamento em Motores fora de Borda "Mercury". Alfeite: Marinha.

posteriormente a compressão, em terceiro lugar a explosão e por fim a evacuação (ou escape).

No tempo da admissão as válvulas encontram-se no período de válvulas cruzadas, isto quer dizer que a válvula de admissão se encontra aberta e a válvula de evacuação se encontra quase fechada, o êmbolo encontra-se no ponto morto superior (PMS) e começa o seu percurso descendente, o qual cria uma depressão na câmara de combustão dando-se assim a admissão da mistura ar/combustível. A admissão da mistura ar/combustível auxilia a evacuação dos gases que possam não ter sido evacuados no tempo de evacuação. Ainda no caminho descendente do êmbolo a válvula de evacuação fecha-se aumentando a depressão e a quantidade de mistura ar/combustível a ser admitida. O ar é admitido através dos coletores de ar e a mistura de ar combustível é feita no carburador.

No segundo tempo do ciclo operativo o êmbolo encontra-se no ponto morto inferior (PMI) e inicia o seu caminho ascendente, no qual ambas as válvulas de admissão e escape se encontram fechadas. Através do movimento ascendente do êmbolo a mistura ar/combustível é comprimida criando assim uma sobrepressão no interior da câmara de combustão.

O tempo da explosão dá-se quando o êmbolo atinge o PMS, com as válvulas de admissão e escape fechadas, neste momento é produzida uma faísca pela vela detonando a mistura ar/combustível. A explosão provoca a expansão dos gases fazendo com que ocorra uma força na coroa do êmbolo, obrigando o êmbolo a fazer o seu caminho descendente, neste momento é quando o motor produz trabalho.

O quarto e último tempo é a evacuação dos gases de escape, o qual é iniciado no PMI e quando a válvula de admissão está fechada e a de escape se abre. A evacuação dos gases dá-se ao longo do movimento ascendente do êmbolo, os quais vão sair posteriormente pelo coletor de escape que guia os gases de escape para o cubo do hélice ou para um orifício na coluna.

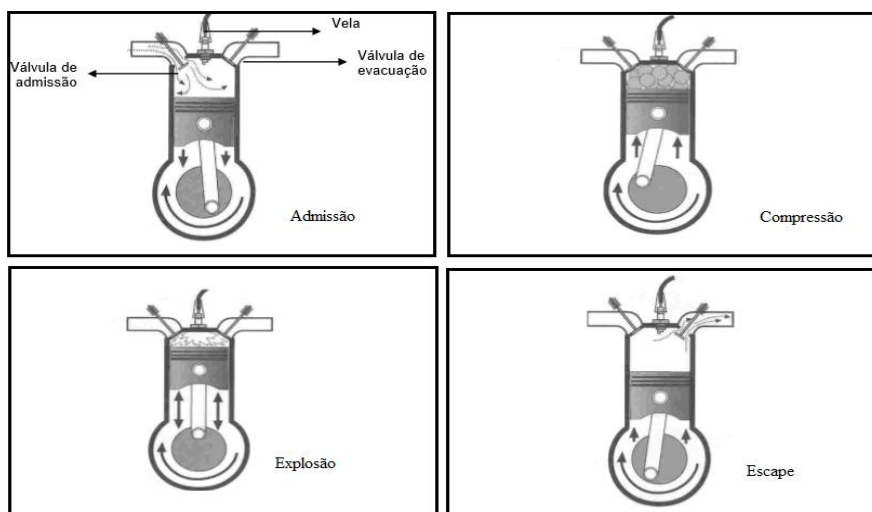


Figura 31 - Ciclo operativo de um motor de explosão a quatro tempos³¹

A caixa de engrenagens reductora inversora é responsável por transformar o movimento unidirecional do motor em dois sentidos de rotação do hélice, rotação a vante ou a ré. Esta transformação de rotação dá-se através da existência de uma engrenagem cónica no final do veio do motor, a qual aciona dois carretos livres. A selecção do carreto que irá transmitir a rotação ao hélice faz-se através de um cursor acoplado ao veio do hélice por estrias. Assim caso o cursor esteja seleccionado para a rotação do hélice a vante, ambas as engrenagens estão a rodar, uma delas livremente e a outra a que faz a transmissão do movimento para o cursor e que por sua vez é transmitida para o veio do hélice. O cursor pode estar numa das três posições, engrenado a vante, engrenado a ré ou na posição neutra. A posição do cursor é seleccionada através de um dado, que pressiona um piclete e que por sua vez cria pressão numa mola seleccionando a posição do cursor. A posição do dado é seleccionada através de um veio.

³¹ Escolas de Tecnologias Navais. (2010). PEETNA2016 - Sistemas de Aperfeiçoamento em Motores fora de Borda "Mercury". Alfeite: Marinha.

F	Veio
S	Dado
T	Cursor
W	Veio do hélice
X	Engrenagem cônica X
Y	Engrenagem cônica Y
Z	Veio transmissor da rotação do motor

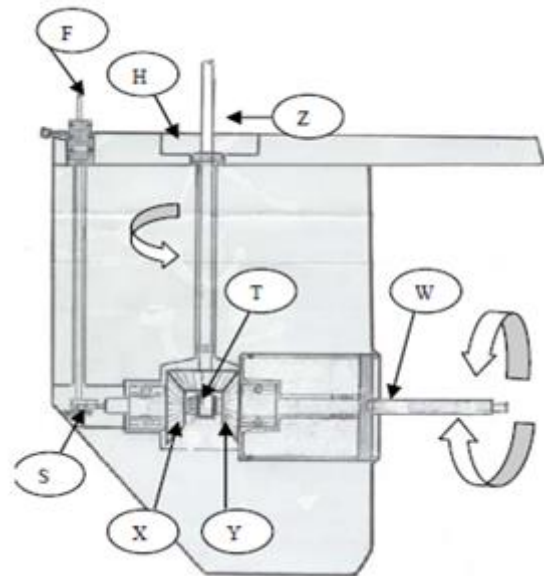


Figura 32 - Caixa de engrenagens redutora inversora³²

2.2 Relação hélice/motor

A interação entre o motor e o hélice é um processo que procura otimizar a conversão de energia libertada pela queima de combustível em impulso, em condições nominais de utilização. A busca desta relação ótima entre motor e hélice é um procedimento que decorre ao longo do projeto e para o qual se procura a otimização dentro dos parâmetros de funcionamento. Os métodos utilizados nesta otimização baseiam-se na relação entre duas características fundamentais dos sistemas em interação. As características que se relacionam para a otimização são a potência e o torque (binário) gerado pelo motor e o torque (binário) absorvido pelo hélice. Esta interação tem que ser feita respeitando o princípio da conservação da energia. Assim, toda a potência gerada pelo motor tem que ser a mesma absorvida pelo hélice, desprezando as perdas que podem existir no sistema. O mesmo se sucede com o torque (binário) que tem que ser igual nas duas extremidades do sistema, caso não exista nenhuma relação na caixa de velocidades. Se houver essa relação, é necessário entrar-se em linha de conta com ela ao longo do estudo do sistema.

³² Escolas de Tecnologias Navais. (2010). PEETNA2016 - Sistemas de Aperfeiçoamento em Motores fora de Borda "Mercury". Alfeite: Marinha.

Para a análise do ponto de funcionamento recorre-se à representação gráfica das curvas de potência dos motores e dos hélices. Essas curvas são representadas em gráficos de potência vs velocidade (Rotações por minuto - RPM) ou binário vs velocidade (RPM).

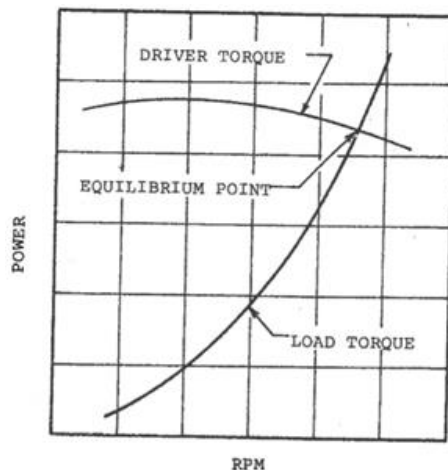


Figura 33 - Equilíbrio entre potência e binário entregue e de carga³³

Como é possível observar, na Figura 33, no eixo das abcissas temos a velocidade em RPM's e nos eixos das ordenadas temos a potência e estão desenhadas as curvas do binário entregue (*Driver Torque*), produzido pelo motor, e do binário absorvido pelo hélice (*Load Torque*). Ao intersestar-se estas linhas obtém-se o ponto de funcionamento ideal (*Equilibrium Point*) e assim pode-se ajustar o motor e o hélice de forma a alcançarem-se a relação desejada. Este ponto de operação teórico não é estático mas sim dinâmico devido a não se entrar em linha de conta, na análise, de alguns fatores que podem provocar alterações significativas tanto no binário como na potência que é transmitida e absorvida. Estes fatores podem ser a resistência do casco que varia caso ele esteja limpo ou com alguma sujidade, alterações climáticas que podem provocar mais resistência, o número de motores que estão a funcionar e alguns sistemas auxiliares que estejam ligados ao motor principal e que necessitam de absorver energia deste para funcionarem (Woodward, 1976).

Sendo o tema principal desta dissertação de mestrado os motores fora de borda de combustão interna, a transmissão da potência e do binário ocorrem através de um veio rotativo ao qual corresponde uma dada velocidade (RPM) e binário, o par de fatores a serem analisados. A velocidade do veio, caso não exista nenhuma redução após o motor

³³ Woodward, J. B. (1976). *Matching Engine and propeller*. Michigan: Universidade de Michigan.

mantém-se inalterada, ao passo que o binário pode sofrer algumas perdas devido à existência de retentores e/ou rolamentos.

Para se ter uma melhor percepção e análise dos pontos de operação de diversos sistemas motor – hélice representa-se, graficamente as curvas dos motores a diferentes pressões médias efetivas ao freio (*Brake Mean Effective Pressure – BMEP*) (EPI inc., s.d.). Esta pressão é uma medida utilizada na comparação da performance entre motores do mesmo tipo, diz respeito a uma pressão média que existe nos êmbolos ao longo de um ciclo que vai produzir uma determinada potência na saída. Esta medida BMEP é puramente teórica e não tem relação com a pressão real que existe nos êmbolos. O BMEP também pode ser descrito como uma relação entre a potência e a velocidade (RPM), sendo assim possível representar por uma reta num gráfico potência – velocidade (RPM) (Woodward, 1976). Se se representar num gráfico as retas BMEP relativas a motores diferentes ou as retas de um motor a diferentes regimes de funcionamento (*Engine Power*) e as curvas de potência dos hélices (*Propeller Power*) num gráfico potência (Power) – velocidade (RPM) obter-se-á um gráfico que se assemelha ao presente na Figura 34. (EPI inc., s.d.)

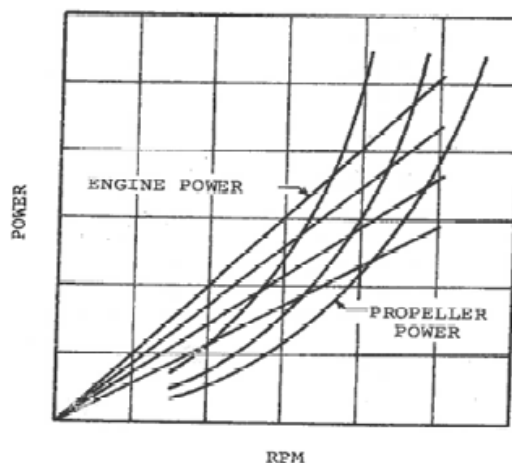


Figura 34 – Equilíbrio entre motor e hélice³⁴

Os pontos de intersecção das duas curvas representam as condições de operação entre estes dois sistemas, sendo possível observar na Figura 34, as várias possibilidades para a interação entre os sistemas motor – hélice. As diferentes curvas de potência dos hélices podem-se obter usualmente com alteração do passo. Normalmente o diâmetro será

³⁴ Woodward, J. B. (1976). *Matching Engine and propeller*. Michigan: Universidade de Michigan.

o máximo disponível, o número de hélices e de pás será tal quanto menor for a vibração e o rácio da área da pá (*Blade Area Ratio- BAR*) tem que satisfazer a carga requerida, assim sendo só será favorável a alteração do passo do hélice. Ao longo das curvas dos hélices obtém-se diferentes níveis de eficiência do mesmo, caso a velocidade do hélice não for a indicada para a sua máxima eficiência, o sistema hélice – motor poderá estar sobredimensionado ou subdimensionado. Assim o hélice poderá não estar a aproveitar toda a velocidade para a qual foi dimensionado e o motor neste caso estará subdimensionado, ou então o motor está sobre-dimensionado e o hélice entra em esforço sendo sobrecarregado numa velocidade inferior àquela para a qual o motor foi dimensionado, ou visto sob a perspetiva do hélice, uma velocidade superior para a qual o hélice foi dimensionado (Woodward, 1976). Como existem muitas variáveis que podem influenciar o ponto de operação ideal, foi elaborado um gráfico no qual é possível observar-se a área de operação (*Operating Region*) do motor, Figura 35. Nesta área tem-se os limites máximos e mínimos das RPM's e da BMEP, na qual o ponto de operação ideal (*Intended Design Point*) será quando a curva do hélice se intersecta com a reta do motor no canto superior direito. Caso o passo seja demasiado baixo as RPM's ideais serão atingidas antes da BMEP ideal ser atingida (*Power if RPM Too High*), se o passo for demasiado grande a BMEP ideal será atingida antes das RPM's ideais (*Power if RPM Too Low*).

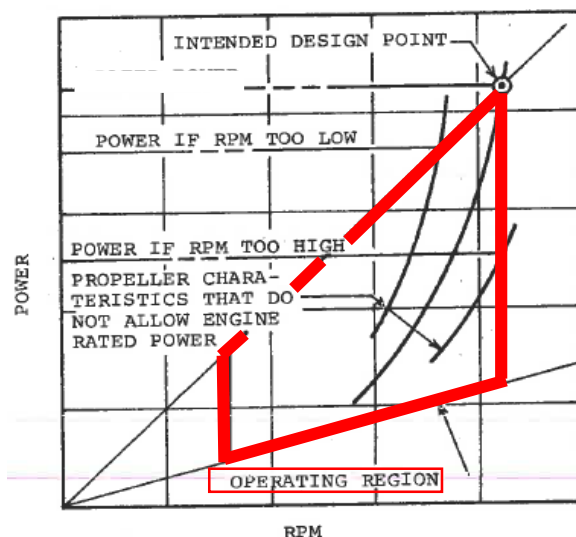


Figura 35 - Área de Operação³⁵

³⁵ Woodward, J. B. (1976). *Matching Engine and propeller*. Michigan: Universidade de Michigan.

Num sistema motor – hélice de passo fixo usualmente a única variável que se consegue alterar é o fluxo de combustível que injetamos no motor, este fluxo controla a BMEP do motor. Assim metendo o motor a funcionar à sua BMEP Ideal de projeto e posteriormente reduzir-se o fluxo de combustível obtém-se diferentes patamares os quais correspondem a BMEP diferentes (*Engine Power*). Desenhando-se no mesmo gráfico a curva de potência do hélice o resultado será a Figura 36. No gráfico é possível observar-se os diversos pontos de operação à medida que se vai diminuindo a BMEP, também é possível observar-se que existe um limite ideal (*Rated RPM*) e um limite mínimo (*Minimum RPM*) de velocidade (RPM). Para baixo do valor mínimo de velocidade do motor que ronda os 20-30% da velocidade ideal, o motor não consegue produzir potência suficiente para poder operar com a embarcação (Woodward, 1976).

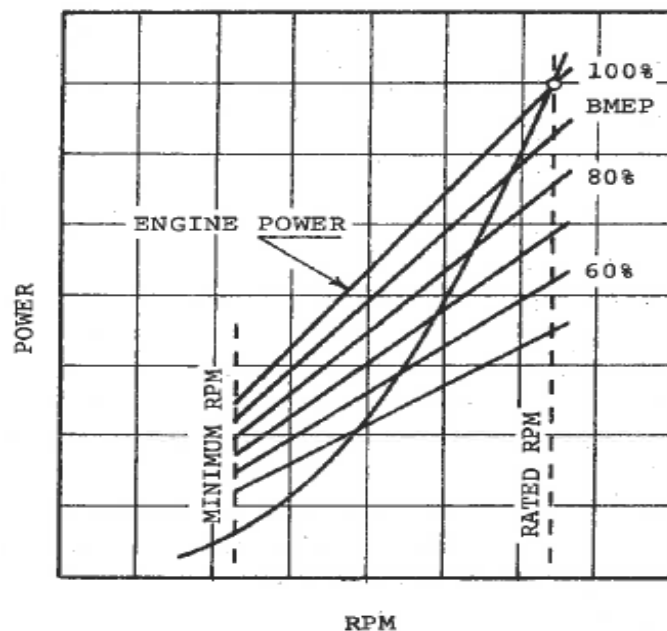


Figura 36 - Operação a baixas rotações³⁶

³⁶ Woodward, J. B. (1976). *Matching Engine and propeller*. Michigan: Universidade de Michigan.

3. Redes neuronais

Uma rede neuronal é composta por elementos simples chamados neurónios e que funcionam em paralelo. A criação destas redes foi inspirada nos sistemas nervosos biológicos sendo estes compostos por biliões de conexões entre elementos que determinam a função da rede. O prelúdio dos estudos destas redes deu-se entre os anos 1940 e 1950 e quem impulsionou este tipo de investigação foi Donald Olding Hebb, um psicólogo com interesses em neuropsicologia. (Gama, Carvalho, Faceli, Lorena, & Oliveira, 2012) Num ser humano a comunicação entre neurónios processa-se através de impulsos elétricos, mais conhecidos por sinapses, tendo estes neurónios a capacidade de processamento e armazenamento da informação. É possível treinar uma rede neuronal artificial com o intuito de resolver uma determinada função, simplesmente mudando os valores ou pesos das diversas conexões. É exigido que uma rede neuronal resolva um determinado problema no qual seja apresentado um dado de entrada e que se solicite um determinado valor de saída específico (Gama, Carvalho, Faceli, Lorena, & Oliveira, 2012). As redes neuronais artificiais são muito utilizadas devido à sua capacidade de solucionar problemas, de aprender, errar e fazer descobertas em vários campos como o reconhecimento de um padrão que pode ser usado para previsão, modelação, classificação e controlo, identificação, classificação e controlo de sistemas, bem como outros campos da engenharia e das finanças. Dentro das redes neuronais artificiais existem diversos modelos de redes dos quais se destacam o modelo de perceptrão simples, perceptrão de multicamadas, mapas auto-organizáveis mais conhecidas como redes Kohonen, funções de base radial (RBF), funções de base elipsoidal (EBF) e as redes de Hopfield.

Basicamente o treino de uma rede neuronal passa pela comparação entre os dados de entrada e de saída que se recolheram previamente, quer através de testes ou simplesmente de registos históricos, e através desta comparação ajustam-se os parâmetros da rede. Para ilustrar melhor o princípio de funcionamento de uma rede neuronal recorre-se à seguinte tabela de experiências, em que os dados de entrada têm duas dimensões, x e y, e os dados de saída uma dimensão, tendo esta apenas dois valores possíveis, correspondentes às classes A e B.

X	Y	Classe	X	Y	Classe
---	---	--------	---	---	--------

1	2	A	3	2	B
2	0	A	3	3	B
2	2	B	3	4	A
2	3	B	4	1	A
2	5	A			

Tabela 1 – Dados de experimentação

Para se ter uma melhor percepção da disposição dos dados disponíveis, estes são apresentados no Figura 37.

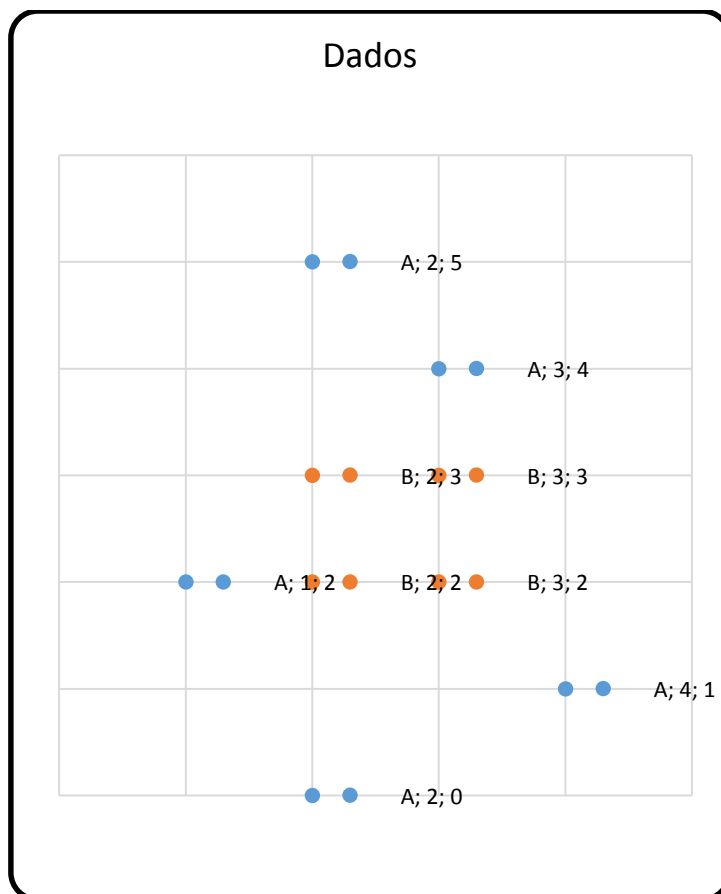


Figura 37 - Dados de Treino

É possível observar através do gráfico que os dados pertencentes à classe “B” se distribuem de forma circular. A percepção da distribuição espacial dos dados de saída é essencial para uma correta escolha da rede a usar, o que é relativamente simples num problema a duas dimensões, como o apresentado, já que o principal objetivo da rede neuronal é dividir geometricamente as classes, utilizando as dimensões das variáveis de entrada.

Considerando o uso de uma rede neuronal com função de base radial, esta irá localizar um círculo no centro geométrico dos dados B, com um raio tal que os englobe

no seu interior. Depois de ajustados o centro e raio do círculo, todos os dados que se apresentem no interior do círculo têm automaticamente a classificação como sendo da classe B, evitando-se assim ter que fazer experiências reais, morosas e de elevado custo (Figura 38).

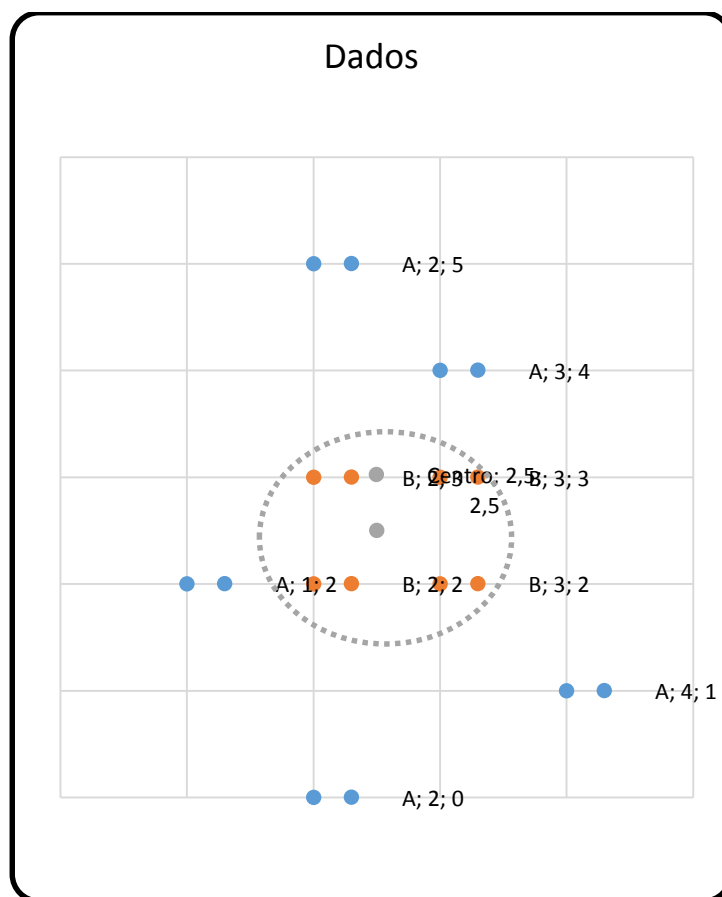


Figura 38 - Resultado do treino da rede neuronal

Para a resolução do problema acima referido também seria possível uma função de base elipsoidal, na qual ter-se-ia de introduzir para além do centro e do raio da elipsoide, a distorção da mesma. Tanto a função de base radial como a função de base elipsoidal necessitariam apenas de uma função para fazer a separação dos referidos dados. Ao passo que se fosse utilizado uma função de base sigmoideal para a separação dos dados, o número de funções a serem utilizadas seriam bastante superiores às utilizadas pelas funções de base radial ou elipsoidal. Isto porque a sigmoide não conseguiria fazer o isolamento das classes com uma só sigmoide, levando assim mais tempo para a resolução do problema.

O processo de treino de uma rede é moroso e o ajuste dos pesos de cada neurónio e das conexões vai-se repetindo até que dado um valor de entrada, a rede neuronal produza o valor de saída desejado.

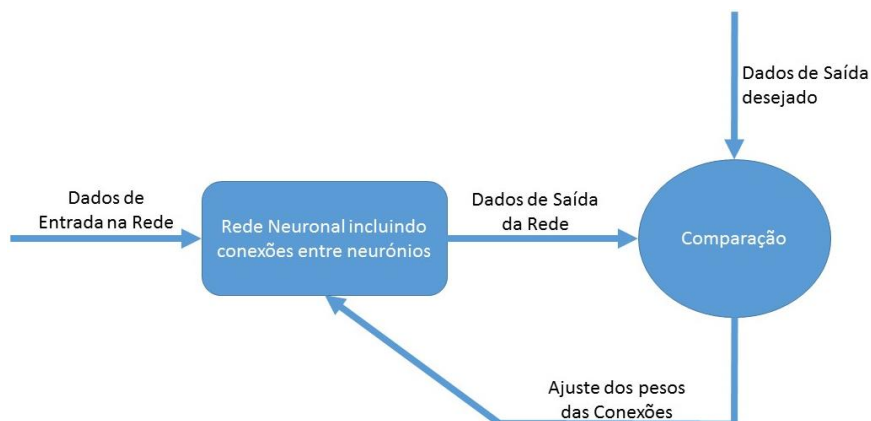


Figura 39 - Fluxograma do treino de uma rede neuronal³⁷

Através da Figura 39 verifica-se como se processa o treino de uma rede neuronal artificial, genericamente. Após se introduzir os dados, as conexões da rede vão processar essa informação e vão gerar um dado de saída que por sua vez será comparado com os dados de saída desejados. Caso estes dados (de saída e desejados) não se igualem, a rede vai transformar os pesos das conexões e de seguida a rede volta a processar a informação, este ciclo repete-se até que o dado de saída da rede seja igual ao dado de saída desejado.

3.1 Processamento dos dados

Uma rede neuronal bem treinada pode ser generalizada para qualquer conjunto de dados, desde que estes estejam dentro da gama dos dados de entrada, utilizados no treino, demonstrando uma grande dificuldade em extrapolar resultados para além da gama de dados de treino. Sendo assim, quanto maior for a base de dados de entrada, utilizada para o treino da rede, maior será a sua capacidade de resposta.

Para se melhorar a eficiência de uma rede neuronal é necessário que os dados, previamente recolhidos, sofram o pré-processamento, pois caso o dado de entrada tenha uma ordem de grandeza superior à dos outros dados de entrada, o peso atribuído a essa ligação será reduzido, de forma a se evitar a saturação da função transferência. Assim esse dado irá ficar com uma importância superior à dos restantes dados pertencentes ao

³⁷ Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.

conjunto de dados de entrada. Este pré-processamento teoricamente não é necessário, só que através da prática as redes demonstram maior eficiência quando os dados sofrem uma normalização (Demuth, Beale, & Hagan, 2009).

3.2 Divisão dos dados

Aquando do treino de uma rede neuronal é costume dividir-se os dados em três grupos distintos, os dados de treino, os dados de teste e os dados de validação. Com os dados pertencentes ao primeiro grupo e utilizando o algoritmo imposto, a rede vai acertando os pesos de cada ligação e modelando a função de ativação de cada neurónio. O segundo grupo servirá como validação da qualidade do treino que a rede sofreu e verificar se a rede está pronta para ser utilizada em casos de apreciação real. O erro deste grupo normalmente vai decrescendo ao longo da fase de treino, bem como o erro do grupo de treino. Normalmente quando a rede começa a atingir o *overfit* dos dados, o erro do grupo de validação tende a aumentar após um período de descida. Através da validação da qualidade da rede, com os dados de teste, a rede fica apta para ser utilizada em problemas de previsão, estimação ou classificação, sendo que os seus resultados refletirão a qualidade do treino proporcionado (Cortes, 2005).

3.3 Overfitting

O maior problema na criação de uma rede neuronal é o quão bem a rede é capaz de ser generalizada. Assim sendo a rede é formulada de forma que a função do erro real seja reduzida ao mínimo aceitável. Esta função entra em linha de conta com a função de custo local a qual depende da função implementada pela rede, o dado de entrada, o dado de saída desejado, os pesos presentes na rede e com a probabilidade de distribuição. O treino da rede passa pela otimização dos pesos presentes na mesma de tal modo que o erro de treino seja reduzido. Não quer dizer necessariamente que quanto menor for o erro de treino, o erro real também o seja (Lawrence & Giles, 2000).

As redes neuronais bem como outros modelos de aprendizagem são suscetíveis ao fenómeno de *overfitting*. Este fenómeno está representado na Figura 40, utilizando um modelo polinomial de aproximação aos dados recolhidos. Um conjunto de dados é gerado através da seguinte função

$$Y = \text{Sen}(x/3) + \mu$$

Equação 14 - Função dos dados recolhidos³⁸

Na qual x é um número inteiro e varia entre 0 a 20 e μ é um número aleatório entre -0,25 e 0,25. Este grupo de dados é utilizado para corresponder a uma determinada função polinomial de ordens entre 0 e 20 (Lawrence & Giles, 2000).

Para a função polinomial de ordem 2, é possível verificar na Figura 40 que a aproximação não se adequa ao padrão seguido pelos dados recolhidos. No caso da função de ordem 10, tem-se que esta aproximação já é razoavelmente melhor. No entanto, à medida que a ordem do polinómio aumenta, a capacidade de generalização da função polinomial começa a decrescer, aumentando assim o *overfitting*. Para a ordem 20 a função polinomial passa por todos os pontos correspondentes ao grupo de dados fornecido, mas a interpolação entre os dados de treino é muito fraca (Lawrence & Giles, 2000).

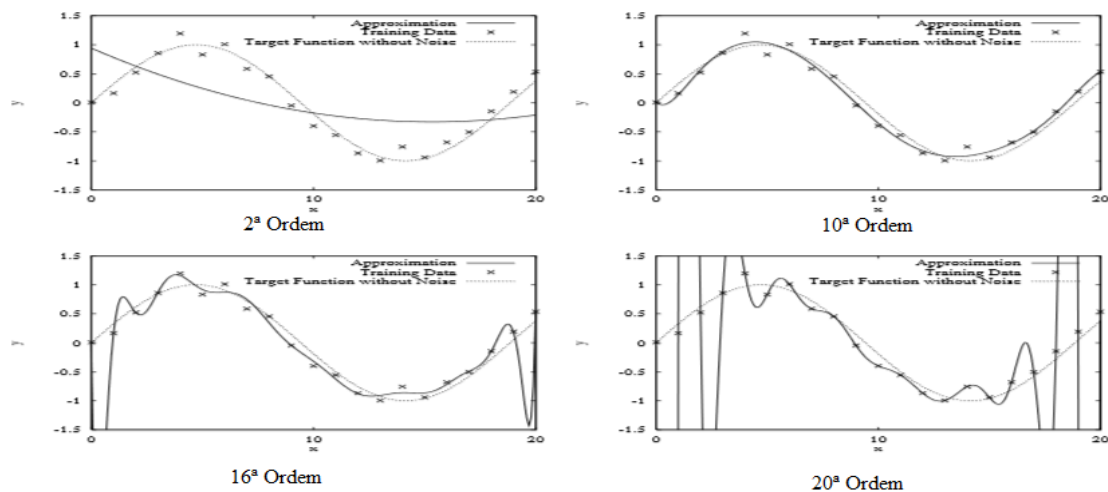


Figura 40 - Resposta de uma função polinomial de ordem 2,10,16 e 20³⁹.

Nas redes neuronais este problema de *overfitting* é muito importante e requer muito trabalho na sua prevenção, utilizando técnicas de seleção de modelos, paragem do treino antecipada e decaimento dos pesos.

³⁸ Lawrence, S., & Giles, C. L. (2000). Overfitting and neural networks: Conjugate Gradient and Backpropagation. *International Joint Conference on neural networks*. Italia: IEEE Computer Society.

³⁹ Lawrence, S., & Giles, C. L. (2000). Overfitting and neural networks: Conjugate Gradient and Backpropagation. *International Joint Conference on neural networks*. Italia: IEEE Computer Society.

3.4 Modelos de redes neuronais

O modelo de perceptrão simples foi o modelo pioneiro na área das redes neuronais e através deste modelo é possível resolver problemas de classificação simples, pois este modelo limita a classe de problemas linearmente separáveis. Com o passar dos anos foi desenvolvido o modelo de perceptrão de multicamadas, o qual é uma melhoria do modelo anterior, e visa responder aos problemas que não tinham solução utilizando o modelo de perceptrão. Assim com o modelo de perceptrão multicamada é possível responder a problemas linearmente não separáveis (Milho, 2000).

O modelo de perceptrão de multicamadas é composto por várias camadas ocultas situadas entre as camadas de entrada e a saída da rede. Estas camadas são compostas por neurónios que reconhecem algumas características e as armazenam em forma de pesos sinápticos. Dentro deste modelo o algoritmo mais utilizado é o *Backpropagation*, no qual é utilizada uma aprendizagem supervisionada por correção e retro propagação do erro, ajustando os pesos de cada neurónio (Milho, 2000).

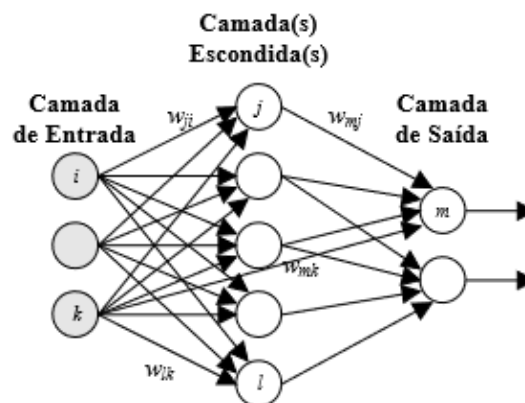


Figura 41 - Modelo Perceptrão Simple⁴⁰

Os mapas Auto-organizáveis utilizam uma aprendizagem competitiva dos neurónios os quais competem entre si para responderem a um estímulo apresentado, à medida que se vai treinando a rede, os neurónios começam a organizar-se em grupos responsáveis por responderem a um determinado tipo de estímulo (Cientifica, s.d.).

⁴⁰ Milho, M. I. (2000). *Redes Neuronais e Reconhecimento de caracteres*. Lisboa: Instituto Politécnico de Lisboa - Instituto superior de Engenharia de Lisboa.

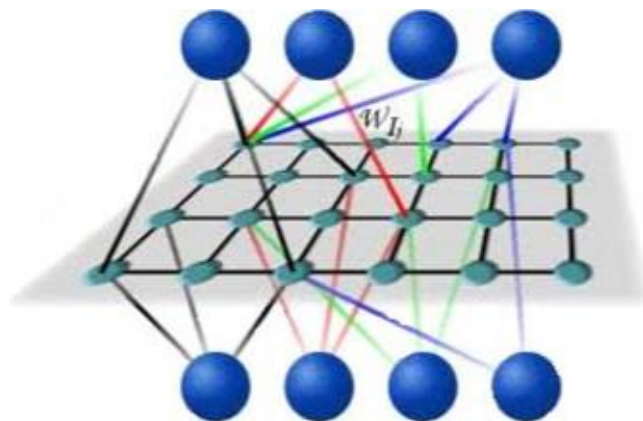


Figura 42 - Exemplo de uma rede de Kohonen⁴¹

Por fim, o último modelo de redes neurais referenciado foi o modelo de Hopfield. Este modelo também é conhecido por redes de memória associativa. Armazena nos neurónios os padrões recuperados pelos dados de entrada. Este armazenamento é feito através do método de aprendizagem Hebbiano. Para que a resposta da rede dependa do estado anterior, as saídas estão conectadas às entradas com um atraso temporal (Científica, s.d.).

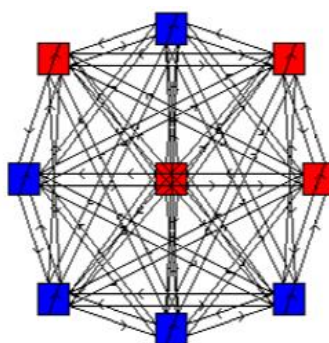


Figura 43 - Exemplo da arquitetura de uma rede de Hopfield⁴²

3.5 Arquitetura de uma rede neuronal

É possível observar na Figura 44 uma rede neuronal elementar com E dados de entrada, em que E é o número de elementos que compõem o vetor dos dados de entrada. Cada dado de entrada tem o seu próprio peso que é representado na Figura 44 pela letra

⁴¹ Científica, L. N. (s.d.). *Modelos de Redes Neurais*. Obtido em 21 de Outubro de 2015, de http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm1_arquitetura.htm/

⁴² Científica, L. N. (s.d.). *Modelos de Redes Neurais*. Obtido em 21 de Outubro de 2015, de http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm1_arquitetura.htm/

w . A entrada para a função transferência f é obtida através da soma do produto dos pesos pelos dados de entrada da rede ($\sum_{i=1}^E p_i w_i$) mais o termo constante, que é próprio de cada neurónio (b) (Demuth, Beale, & Hagan, 2009).

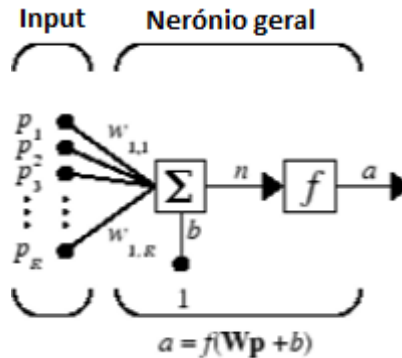


Figura 44 - Rede neuronal elementar⁴³

Uma rede neuronal pode utilizar um dos três tipos de função transferência existentes, estas funções são a função transferência Log-Sigmoide, a função transferência Tan-Sigmoide ou a função transferência Linear. A função transferência Log-sigmoide gera dados de saída no intervalo de valores entre $[0,1]$, podendo o somatório dos dados de entrada pertencer ao intervalo de valores entre $[-\infty, +\infty]$. A função transferência Tan-Sigmoide gera dados de saída no intervalo de valores entre $[-1,1]$, à semelhança da função anterior os dados de entrada podem pertencer ao intervalo de valores entre $[-\infty, +\infty]$. A função de transferência linear trabalha na mesma gama de valores que a função de transferência Tan-Sigmoide, mas ao passo que a função de transferência linear é utilizada para problemas simples, os quais são possíveis separar através de uma função linear, a função transferência Tan-Sigmoide é utilizada para problemas de reconhecimento de padrões. Para além destas funções transferência, se for necessário, é possível criar uma função transferência de forma a adaptar-se ao problema em estudo (Demuth, Beale, & Hagan, 2009).

⁴³ Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.

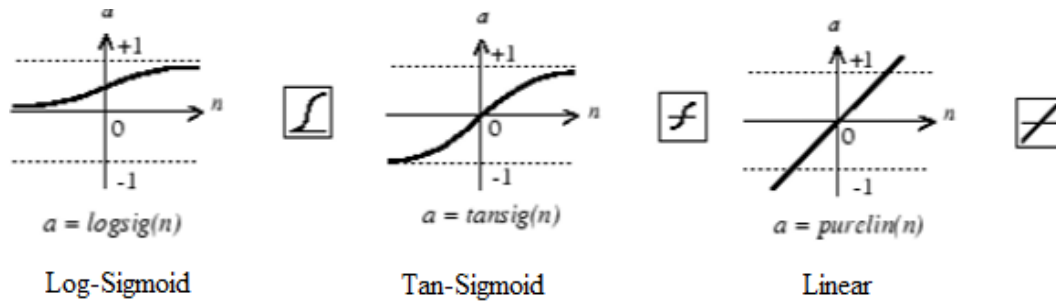


Figura 45 - Funções transferência⁴⁴

Na Figura 46 é possível observar o esquema de uma rede neuronal com uma só camada de neurónios composta por S neurónios com a função Log-sigmoide e com R dados de entrada e também é possível observar um diagrama simplificado da mesma rede simples (Demuth, Beale, & Hagan, 2009).

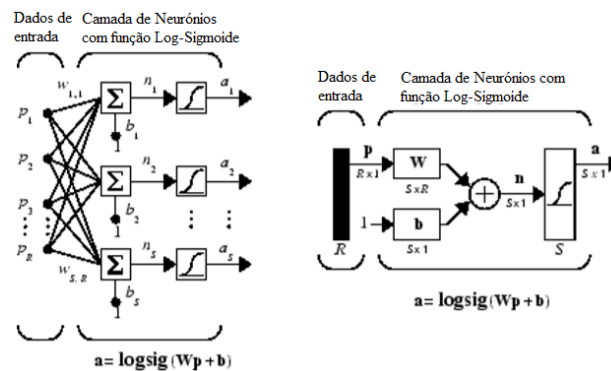


Figura 46 - Esquema e Diagrama de uma rede neuronal com uma só camada⁴⁵

As redes neurais constituídas por múltiplas camadas, normalmente são compostas por uma ou mais camadas de neurónios, as quais utilizam a função de transferência por sigmóides, seguidas de uma camada de saída com neurónios que utilizam a função de transferência linear. As múltiplas camadas de neurónios com funções de transferência não lineares permitem que a rede aprenda relações não lineares entre os dados de saída e os dados de entrada. A camada de saída linear é normalmente utilizada para problemas de regressão não linear. Se o objetivo da rede neuronal for restringir os seus dados de saída a um intervalo de valores predefinido, então a camada de saída deverá ser uma sigmoide com a função de transferência Log-Sigmoid. Estas redes são usadas para problemas de reconhecimento de padrões nos quais a decisão recai sobre a rede

⁴⁴ Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.

⁴⁵ Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.

(Demuth, Beale, & Hagan, 2009). Ao adicionar-se camadas internas na rede, está-se a aumentar o seu potencial de computação capacitando a rede de detetar menores variações nos parâmetros de entrada. Se uma rede for composta por mais que uma ou duas camadas internas pode-se correr o risco de se viciar a rede, pois os neurónios memorizam uma grande percentagem dos casos de treino, deixando a sua resposta de ser uma análise sistemática para ser um relembrar dos vários casos (Cortes, 2005). Assim as redes mais usadas são compostas por duas camadas como se pode ver na Figura 47. Estas redes podem aproximar qualquer função com um número finito de descontinuidades arbitrárias, dando os neurónios suficientes em cada camada.

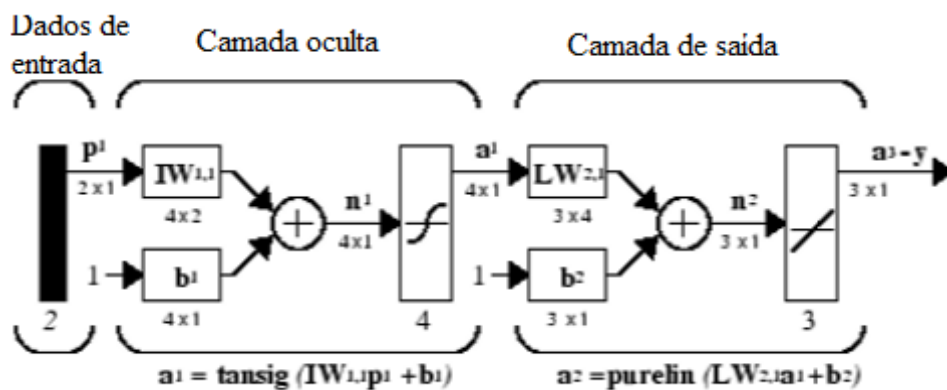


Figura 47 - Rede Neuronal com duas camadas⁴⁶

⁴⁶ Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.

4. Modelo de plano de testes

Para facilitar e sistematizar a recolha dos dados recorreu-se a um modelo de plano de teste que é utilizado pela Marinha Brasileira, adaptando-o da publicação brasileira EMA-333 (2004) às circunstâncias e objetivos desta dissertação de mestrado. Com isto pretende-se ter um documento no qual está inserida toda a informação necessária para a realização de uma experiência real, que visa a recolha de dados empíricos de um determinado sistema e que, com a posse deste documento, seja possível reproduzir e conduzir os testes independentemente da entidade responsável pela sua condução, obtendo e validando novos dados amostrais.

Segundo a publicação EMA-333 (2004), um plano de teste divide-se em:

1. Propósito;
2. Pré-Requisitos;
3. Duração estimada\Fita de tempo;
4. Variáveis de teste:
 - a. Dependentes;
 - b. Independentes:
 - i. Controladas;
 - ii. Não-Controladas;
5. Recursos Necessários:
 - a. Materiais;
 - b. Humanos;
 - c. Imateriais;
6. Ambiente de Operação;
7. Condições Iniciais;
8. Segurança;
9. Procedimentos;
10. Referências;
11. Anexos.

No parágrafo/item do “propósito” do plano de testes será discriminada qual é a finalidade do (s) teste (s) a realizar. O parágrafo/item “pré-requisitos” abordará as ações que serão realizadas antes da execução do teste. Para a duração estimada\Fita de tempo

pretende-se que fique exposto de forma estimativa, o tempo que irá ser gasto na execução do teste, não incluindo os tempos para descanso, substituições e reposicionamento, nem tempos de preparação para os testes.

Relativamente às variáveis de teste, existem as dependentes, as quais correspondem aos elementos essenciais de análise que se desejam determinar, e as independentes, que podem ser variáveis independentes controladas e variáveis independentes não controladas. As controladas são aquelas que são impostas por quem está a planear os testes, como por exemplo, o rumo e a velocidade que uma determinada embarcação tem que seguir durante o teste, e as variáveis independentes não controladas não podem ser controladas por quem planeia os testes, por exemplo as condições ambientais.

No que toca aos “recursos necessários” ficam discriminados todos os materiais, pessoas com as suas funções e os “recursos imateriais” que são necessários para a realização das provas. Entenda-se por “recursos imateriais” as correntes, voltagens, avaliações de risco, documentação e técnicas para obter realismo.

Na secção que diz respeito ao “ambiente de operação” pretende-se que sejam discriminados os seguintes parâmetros: área de exercício, área alternativa ou secundária, condições ambientais que por questões de segurança não podem ser testadas, limitações devido a restrições de custos.

As “condições iniciais” dizem respeito à situação particular do sistema antes do momento de se iniciar um teste. No tópico “segurança” são discriminadas todas as normas de segurança diferentes das usualmente ou formalmente estabelecidas. No ponto dos “procedimentos”, o principal objetivo é fazer-se uma descrição detalhada dos passos a serem seguidos no processo de condução e execução cronológica dos testes, bem como o registo dos dados. De forma a evitar más interpretações, os procedimentos têm que ser escritos de forma clara e concisa.

Nas “referências” deverão constar os documentos a disponibilizar durante a execução dos testes. A secção dos “anexos” deve contemplar os modelos de recolha de dados, diagramas, desenhos, tabelas, figuras e mapas relativos aos testes.

5. Planeamento dos testes

5.1 Testes com a semirrígida

Estes testes têm como principal objetivo a recolha de dados relativos ao comportamento da semirrígida em diversas condições de carga, regimes de rotação do motor, que será controlado pela posição do manípulo do acelerador, bem como para diferentes hélices, os quais têm características diferentes entre si, tais como o número de pás, o passo e o diâmetro. Os dados recolhidos nos testes servirão para o treino de uma rede neuronal que determinará qual o hélice que melhor se adequa à missão empregue à semirrígida autónoma. Para a execução dos testes é necessário a obtenção e preparação do material, das autorizações necessárias tanto para a utilização da semirrígida como a autorização do espaço onde se vai realizar os ensaios e obter-se os conhecimentos necessários para se efetuar a troca dos hélices e dos procedimentos de colocar e retirar a semirrígida na água. No aprontamento da semirrígida para os testes é necessário adquirir-se conhecimento sobre o funcionamento do motor fora de borda que a equipa, fazer a divisão do depósito de combustível de $\frac{1}{2}$ l em $\frac{1}{2}$ l para que seja mais fácil a leitura da variação de combustível no final de cada ensaio e também é necessário estabelecer as quatro posições do manípulo do acelerador do motor com que a semirrígida irá operar. Para a organização dos dados encontra-se a necessidade de criar uma grelha em papel, na qual se efetue a recolha dos dados no final de cada ensaio e que, posteriormente, estes valores sejam carregados numa folha Excel, com o intuito de armazenar e organizar os dados. Esta folha em Excel, para além de fazer a recolha dos dados, também faz as médias ponderadas do tempo demorado durante os ensaios e as médias de consumo de combustível durante os ensaios para cada teste, de forma a evitar alguns erros que possam haver durante a recolha dos dados. Relativamente à carga que será induzida à semirrígida, considera-se que a condição inicial da semirrígida é composta pelo peso do patrão da semirrígida, mais o peso de um depósito de combustível e mais o peso leve da semirrígida com o motor, posteriormente recorre-se a sacos de plástico com areia que pesem 20 Kg, para criar as restantes condições de carga. Cada condição de carga pretende simular a adição de pessoas ou material à semirrígida, para tal adiciona-se 100 Kg, ou seja cinco sacos de plástico com areia, previamente pesados. O material necessário para a realização dos testes está presente no Apêndice 1. Os testes foram planeados serem efetuados nas

duas semanas entre 27 de Abril e 8 de Maio de 2015. Ao longo das duas semanas é necessário testar-se a resposta da semirrígida para quatro hélices diferentes, quatro regimes de carga diferentes e para quatro posições do manípulo do acelerador diferentes, sendo que cada teste contempla três ensaios de forma a se reduzirem os efeitos que possam ser causados pelas variáveis estocásticas, para tal é necessário planejar-se sessenta e quatro testes e cento e noventa e dois ensaios.

É possível observar-se na Tabela 2 o planeamento para cada teste. Cada teste está dividido em quatro fases, o posicionamento da semirrígida, o primeiro ensaio, o segundo ensaio, o terceiro ensaio e o reposicionamento da semirrígida ou o regresso da mesma ao cais do Clube Naval dos Oficiais e Cadetes da Armada (CNOCA) para se executar a variação da condição de carga. Para cada fase de um teste estão dedicados em média cinco minutos, demorando cada teste em média de vinte e cinco a trinta minutos.

Duração de um Teste				
Posicionamento	1ºEnsaio	2ºEnsaio	3ºEnsaio	Reposicionamento\Regresso
5 min	5 min	5 min	5 min	5 min

Tabela 2 - Fita de tempo de um só teste

No Apêndice 2, encontra-se discriminado o planeamento de testes que estão previstos para as duas semanas. Para o primeiro dia encontra-se planeado o aprontamento da semirrígida o qual engloba o desenho das linhas no tanque de combustível, o desenho no acelerador do motor das quatro posições que irão ser utilizadas, a preparação dos hélices que irão ser estudados, o acoplamento do primeiro hélice a ser testado, a preparação dos sacos de plástico para a variação da condição de carga e a colocação da semirrígida na água. Os testes estão previstos serem realizados todos os dias entre as 09 horas e 30 minutos até às 16 horas e 30 minutos, havendo uma pausa para almoço entre as 11 horas e 30 minutos e as 13 horas e 30 minutos. Em cada dia estará previsto trinta minutos no início do dia para preparar o material, no cais do CNOCA, necessário para os testes previstos para esse dia e trinta minutos no final do dia dedicados à arrumação do mesmo material no hangar do CNOCA. A sequência dos testes será: para o mesmo hélice e condição de carga executa-se as quatro posições do acelerador, posteriormente passa-se para a próxima condição de carga e executa-se de novo as quatro posições do acelerador, de seguida executa-se o mesmo procedimento para as restantes condições de carga até à

última condição. Ao terminar-se todos os testes previsto para o mesmo hélice, excuta-se a troca do hélice. Assim está dedicada uma hora para se tirar a semirrígida de dentro de água, proceder-se à troca do hélice e por fim a colocação da semirrígida, novamente, dentro de água. Procedendo-se da mesma maneira para todos os hélices.

É possível observar-se na Tabela 3 as variáveis dependentes, independentes controladas e não controladas que irão ser registadas no decurso dos testes. Os hélices foram escolhidos de tal forma que no global se conseguisse variar todas as suas variáveis (não se controlando a forma do perfil da pá?), como o passo do hélice, o seu diâmetro e o número de pás. Dentro dos quatro hélices disponíveis tem-se os passos de 9'', 12'', 13'' e 14'', respetivamente os diâmetros dos hélices são 12,25'', 11,375'', 10,1'' e 10,3'' e o número de pás para os dois primeiros são três pás e os últimos dois hélices têm quatro pás.

Variáveis de teste		
Dependentes	Independentes	
	Controladas	Não controladas
Passo do hélice (in)	Tempo de duração (min)	Resistência do casco
Diâmetro do Hélice (in)	Nível do combustível (l)	Condições climatéricas
Condições de carga (Kg)	Percurso a efetuar (Km)	Cavitação
Regime de Rotação do Hélice (RPM)		Altura da Maré
Número de pás		Estado da Maré

Tabela 3 - Variáveis de teste

Para os vários regimes de carga vai-se considerar como condição inicial de carga o deslocamento leve da semirrígida, mais o peso do motor fora de borda, mais o peso do depósito de combustível e mais o peso do patrão da semirrígida, assim considera-se que a condição inicial de carga do conjunto 0 Kg. Para os outros três regimes de carga vai-se adicionando sempre mais 100 Kg à carga anterior, sendo as condições de carga 0 Kg, 100Kg, 200Kg e 300 Kg. Para os regimes de rotações vai-se considerar quatro posições do acelerador da semirrígida, visto que os resultados dos testes só podem ser aplicados ao conjunto semirrígida-motor em análise e como os dados quando analisados pela rede

neuronal sofrem um pré e um pós processamento. Neste caso os dados a serem analisados serão as quatro posições do acelerador.

Como área principal para os ensaios tem-se o percurso de ida e volta entre o Arsenal do Alfeite e o final do cais 8 da Base Naval de Lisboa (BNL) que em média tem uma distância de 1,6 Km (Apêndice 3). Caso exista algum contratempo ou necessidade de se alterar a área dos ensaios tem-se como área secundária para os ensaios o percurso de ida e volta desde o cais flutuante do CNOCA e o duque d'Alva da BNL, este percurso mede em média 1 Km (Apêndice 4). O tempo de duração de cada ensaio irá ser medido com um cronómetro e será iniciada a contagem do tempo, no percurso principal, assim que a proa da semirrigida passar pelo final do cais do Arsenal do Alfeite e terminada a contagem assim que no percurso de regresso a proa passar pelo final do cais do Arsenal do Alfeite. No percurso secundário o tempo é iniciado quando a semirrigida passa pelo segundo cabeço do cais de honra a contar do CNOCA e é interrompida a contagem do tempo assim que a semirrigida tiver dado a volta ao duque d'Alva e que passe outra vez pela marca de partida. Para a medição do nível do combustível é necessário parar o motor, colocar o depósito na vertical e ler na régua de medição a quantidade de litros que estão presentes no depósito, para que esta medição seja mais fiável é necessário marcar o depósito com intervalos de $\frac{1}{2}$ l em $\frac{1}{2}$ l.

As variáveis não controladas de resistência do casco e cavitação são duas grandezas que estão inerentes à forma do casco da semirrigida e às formas dos hélices. As condições climatéricas são uma das variáveis que não se podem controlar mas que se podem restringir. Para se obter a altura da maré e o estado da maré, antes de se iniciar qualquer ensaio regista-se as horas do mesmo, para que posteriormente através das tabelas de marés se consiga determinar qual era a altura e o estado da maré durante os testes.

Antes da realização de cada teste é necessário confirmar se o hélice pré-determinado para o teste se encontra colocado no motor da semirrigida e se a condição de carga é a que foi pré-planeada para o período de tempo que vai decorrer um determinado teste. Posteriormente é necessário colocar a semirrigida no local de início dos ensaios (cais do Arsenal do Alfeite), aprovada ao cais número 8 da BNL, caso seja o percurso principal a ser usado. Para o caso de se usar o percurso secundário colocar a semirrigida ao lado do cais flutuante antes da marca de partida e aproar a semirrigida ao duque d'Alva.

Fazer-se o registo no modelo de recolha de dados do nível de combustível presente no depósito no instante antes de se começar o ensaio, a hora de início do ensaio e meter o cronómetro pronto a contar. Para se dar início ao ensaio com a devida distância à marca de partida levar o acelerador até ao regime de rotação definido para o teste e quando a proa da semirrígida passar pela marca de partida meter o cronómetro a contar. No regresso parar o cronómetro assim que a proa da semirrígida passar outra vez pela marca de partida e parar o motor. Por fim fazer o registo do tempo e do nível de combustível presente no tanque no modelo de recolha de dados e preparar próximo ensaio.

Como normas de segurança para a realização dos testes tem-se que é obrigatório envergar sempre o colete de salvação quando dentro da semirrígida e a navegar. Para o bom funcionamento do motor verificar várias vezes se o motor está a fazer a refrigeração devida, observando se o jato de água que o motor liberta. Verificar também se os flutuadores não perdem ar e tomar atenção a alguns ruídos que possam haver diferentes do habitual. Quanto ao manuseamento da semirrígida ter principal atenção para ninguém passar por baixo da semirrígida quando esta está no ar a ser colocada ou tirada de dentro de água. Também é necessário que exista comunicação via VHF entre o patrão da embarcação e um elemento do CNOCA no caso de haver alguma emergência. Caso esteja a haver movimentação de navios dentro da BNL e que a movimentação dos mesmos se interponha no percurso dos testes, os mesmos têm que ser suspensos e reiniciados assim que possível.

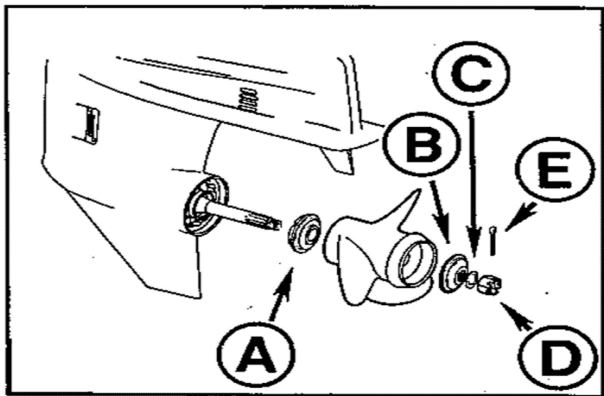


Figura 48 - Componentes de ligação do hélice ao veio

Legenda			
A	Anilha de centragem estriada e de encosto	D	Porca de Fixação
B	Anilha de centragem estriada	E	Freio
C	Anilha		

Para se desacoplar o hélice, primeiro desfrenar a porca de fixação do hélice depois desapertar a porca de fixação com uma chave de tubos ou de luneta. Posteriormente retirar as anilhas de centragem estriada, retirar o hélice e as anilhas de centragem estriadas e de encosto. Ter o máximo cuidado em colocar um bloco de madeira entre a patilha anti cavitação e o hélice para evitar um possível arranque do motor. Aplicar uma ligeira camada de massa lubrificante apropriada “MULTIPURPOSEQUICKSILVER” ou outra indicada pelo construtor nas estrias do veio propulsor. Colocar nas estrias do veio a anilha estriada de encosto, anilha de centragem, o hélice e as anilhas de centragem estriadas. Colocar a porca de fixação do hélice no veio propulsor e apertá-la com uma chave de tubos ou luneta e frená-la.

A informação presente neste subcapítulo está resumida no caderno de provas apresentado no Apêndice 5 que deverá estar sempre presente no decorrer dos testes.

5.2 Estudo com as redes neuronais

Neste subcapítulo aborda-se o planeamento dos estudos que irão ser feitos com as redes neuronais. O programa a ser utilizado para estes estudos será o MATLAB. Os estudos com as redes neuronais serão divididos em três fases, normalização dos dados, seleção da melhor arquitetura de rede e por fim a aplicação da rede.

A primeira fase do estudo será a normalização no intercalo [-1;1], dos dados recolhidos, referentes ao passo, diâmetro, número de pás, carga da semirrígida, posição do acelerador, altura da maré, estado da maré, tempo e consumo, ao longo dos testes com a semirrígida. Após se ter os dados todos normalizados, tem-se a segunda fase do estudo, seleção da arquitetura de rede que melhor se adapta à resolução deste problema, esta rede será seleccionada por apresentar o menor erro com o conjunto dos dados de teste. Este erro corresponde ao somatório do erro médio quadrático das duas variáveis de saída e é calculado através da seguinte equação (Monteiro, 2001),

$$mse = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{N}$$

Equação 15 - Calculo do erro médio quadrático⁴⁷

⁴⁷ Monteiro, J. F. (2001). Estimadores de máxima verosimilhança para combinação captura - recaptura e trajectos lineares e as suas propriedades. Évora: Universidade de Évora.

Na qual:

- mse corresponde ao erro médio quadrático (*mean square error*);
- \hat{Y} é o valor de saída da rede;
- Y é o valor real obtido;
- N é o número de dados de teste.

Nesta procura de rede mais eficiente, é necessário ter-se em consideração que existem muitos parâmetros que podem ser alterados, ao longo dos vários testes, e que através da sua alteração pode-se obter resultados nos quais se vai obtendo um erro menor e noutros um erro maior. Quanto mais parâmetros se pretender alterar, maior será o tempo de computação por parte do computador. Assim, para a escolha da rede que melhor se adapta a este problema, é necessário restringir e definir quais serão os algoritmos de treino, funções de transferência, número de camadas, quantidade de neurónios por camada e parâmetros de divisão dos dados. Na escolha dos diferentes parâmetros que se pretendem alterar houve uma colaboração com o camarada Cardoso da Silva, de modo a reduzir-se o tempo despendido na análise de todos os parâmetros. Alguns dos parâmetros usados pelo camarada Cardoso da Silva são idênticos aos que foram utilizados nos testes realizados nesta dissertação de mestrado, de modo a verificar se os parâmetros que são diferentes são mais proveitosos. Os algoritmos de treino a serem testados são três (Tabela 4):

Função em MATLAB	Descrição
trainlm	<i>Backproagation</i> Levenberg-Marquardt
trainrp	Resilient <i>Backpropagation</i>
traingd	Gradient Descent <i>Backpropagation</i>

Tabela 4 - Algoritmos de treino utilizados para a seleção da rede

Estes algoritmos de treino foram selecionados, pois são os que são mais utilizados no treino de redes neuronais e são os que apresentam um tempo de treino mais reduzido (Demuth, Beale, & Hagan, 2009).

Dentro das funções de treino, segundo a bibliografia estudada (Demuth, Beale, & Hagan, 2009), na camada de saída normalmente será utilizada uma das seguintes funções:

Função em MATLAB	Descrição
logsig	Sigmoide
purelin	Linear

Tabela 5 – Funções de transferência da camada de saída.

No caso da(s) camada(s) intermédia(s), as funções de transferência mais utilizadas são:

Função em MATLAB	Descrição
Tansig	Sigmoide tangente hiperbólica
Radbas	Base radial
Hardlims	Limite simétrico

Tabela 6 - Funções de transferência da(s) camada(s) intermédia(s)

Os dados normalizados serão divididos aleatoriamente, no início de cada treino, em três grupos, grupo de treino, grupo de validação e grupo de teste (o objetivo desta divisão encontra-se explicado no capítulo Divisão dos dados). Os dados são divididos aleatoriamente pois esta divisão apresenta melhores resultados, num menor período de tempo de computação, do que se os fôssemos dividir manualmente (Bergstra & Bengio, 2012). O grupo de validação corresponderá a uma percentagem dos dados totais de 75%, o grupo de validação, bem como o grupo de teste, corresponderão a uma percentagem dos restantes dados de 15% cada.

Primeiramente, para se descobrir qual é a melhor arquitetura de rede, ir-se-á fazer cinco experiências com as várias funções de treino e funções de transferência. Nestas experiências só se considera a rede composta por uma camada de neurónios intermédia, esta camada pode ser composta por um número de neurónios que varia entre um neurónio e vinte neurónios. Com os resultados das cinco experiências, seleciona-se as três arquiteturas que em cada experiência apresentam o menor erro de teste, posteriormente compara-se com as outras experiências, e as três arquiteturas que mais se repetirem, ao apresentarem o menor erro de teste, são consideradas como arquiteturas vencedoras.

O próximo passo, para se descobrir qual a função de treino e funções de transferência que obtém o menor erro de teste, será treinar dez redes para cada uma das arquiteturas vencedoras, com um número de neurónios a variar entre um e dez, e verificar-se em qual das arquiteturas se obtém o menor erro de teste. Selecionando qual será a arquitetura vencedora, verificar na análise anteriormente feita, com quantos neurónios a rede obtém os menores valores de erro de teste, nos dez testes feitos. Por sua vez, treinar de novo várias redes, com um número de neurónios igual aos selecionados, mas desta vez, de forma que o erro de teste obtido pela rede treinada, seja inferior ao maior erro obtido entre os menores erros de teste dos dez testes. Deste modo obtém-se a arquitetura

de rede que atinge os menores erros de teste e que por sua vez obtém melhores resultados, tendo sempre em conta ao longo da análise, a possibilidade de *overfitting*.

Por último e para se verificar que esta rede é a que obtém melhores resultados, fazer os testes para as mesmas funções transferência e função de treino, mas numa rede com duas camadas, em que em cada camada o número de neurónios varie entre um e dez e comparar os resultados obtidos com os testes da rede com uma camada e com duas. Caso se verifique que a rede com duas camadas obtém menor erro de teste, identificar qual é a arquitetura vencedora.

A terceira fase do estudo das redes neuronais, será a aplicação da arquitetura vencedora e verificar qual será o hélice mais económico, variando as várias características de entrada. Nesta fase ir-se-á usar as características dos quatro hélices testados, para os estados de maré a encher e a vazar, bem como para as alturas de maré máxima, média e mínima. Através da análise dos resultados, poder-se-á dizer se a rede terá capacidade de produzir resultados fidedignos.

6. Discussão de resultados

Neste capítulo da dissertação de mestrado vai-se analisar separadamente as duas fases dos testes, os testes na bacia de manobra utilizando a semirrígida e o motor fora de borda e os testes feitos às redes neuronais utilizando o programa MATLAB.

Na secção dos testes com a semirrígida, dá-se a conhecer os processos realmente utilizados ao longo dos testes na bacia de manobra, utilizando a semirrígida com o motor fora de borda, bem como alguns procedimentos que deveriam ser melhorados, para trabalhos futuros. Também irão ser apresentados e analisados os resultados obtidos. À semelhança da secção acima descrita a secção dos testes com a rede neuronal tem como objetivo demonstrar o processo de treino da rede neuronal, seleção da arquitetura mais eficiente, a aplicação da arquitetura vencedora e a análise dos resultados da mesma.

6.1 Testes com a semirrígida

O planeamento dos testes foi elaborado, de tal modo que o motor fora de borda a ser testado fosse um Evinrude de 50 hp, mas este durante o período de preparação dos testes avariou-se. Com isto, foi necessário arranjar uma alternativa para a realização dos testes. Assim foi verificada a compatibilidade dos hélices com outros motores que se encontravam no CNOCA. O motor selecionado foi um Yamaha de 30 hp (Apêndice 1) e a semirrígida que é equipada por este motor encontra-se no Apêndice 2. O depósito de combustível já se encontrava dividido de dois em dois litros, mas para se ter uma melhor perceção da variação do combustível, no final dos percursos escolhidos, foi necessário dividir a escala existente no depósito em espaços de ½ litro cada um (Apêndice 3). Primeiramente na seleção dos quatro regimes de rotação do motor, foram feitas algumas corridas de experiência, na bacia de manobra com o intuito de se verificar em que posições é que a rotação do hélice variava, esta variação de rotação era determinada auditivamente e através da posição do manípulo do acelerador. Posteriormente foram marcados os quatro regimes de rotação do motor na caixa do acelerador do motor, Apêndice 4, e o objetivo era levar a extremidade do manípulo até à linha desenhada na caixa do acelerador.

Foram utilizados quatro hélices nos testes executados. O hélice 1 é o hélice que já equipava o motor fora de borda da semirrígida com três pás, 11,75'' (29,845 cm) de diâmetro e 12'' (30,48 cm) de passo, o hélice 2 é um hélice Mercury Spitfire com quatro

pás, 10,1'' (25,654 cm) de diâmetro e de passo 14'' (35,56 cm), o hélice 3 é um hélice Mercury Black Max com 3 pás, diâmetro 12,25'' (31,12 cm) e de passo 9'' (22,86 cm) e por fim o hélice 4 é um Mercury Spitfire com quatro pás, 10,3'' (26,162 cm) de diâmetro e 13'' (33,02 cm) de passo. É possível observar os três hélices Mercury utilizados no Apêndice 5 e no Apêndice 6, não foi possível tirar fotografia ao hélice 1 porque este foi perdido no decurso dos testes. Após ter completado os testes com a condição inicial, mais 100 Kg e mais 200 Kg, com o hélice 1 foi necessário utilizar o percurso alternativo pois não havia autorização para a utilização do percurso inicial. Com a perda do hélice 1 (3 pás 11,75'' x 12P), que equipava a semirrígida e como só se tinham recolhidos os dados referentes às condições 0 Kg, 100 Kg e 200 Kg e devido também à disponibilidade da semirrígida, para essas duas semanas, ser reduzida, foram eliminados os testes com condição de carga 300 Kg do planeamento. Para cada dia de testes foi desenhado o gráfico de variação das marés, como os três ensaios para completar um teste foram executados num período de tempo de aproximadamente 30 minuto, então foi utilizada a média das horas entre os três ensaios realizados. No Apêndice 7, Apêndice 8, Apêndice 9 e Apêndice 10 é possível observar-se os gráficos das marés para os dias em que foram realizados os testes. Os dados recolhidos para os quatro hélices, três regimes de carga e quatro regimes de rotação do motor estão presentes nos apêndices entre o Apêndice 11 até ao Apêndice 22, e o Apêndice 23 apresenta uma tabela resumo da média dos dados recolhidos para cada teste. Como a medição da distância dos percursos não foi exata em todos os ensaios, não é possível fazer-se comparações entre a velocidade que a semirrígida atinge, com os diferentes hélices. Assim o que é possível comparar são os consumos e em função do tempo do teste.

Em primeira análise, é possível observar que para cada hélice e para cada condição de carga, o consumo de combustível mantém-se constante enquanto que o tempo, que a semirrígida levou a percorrer o trajeto, vai diminuindo à medida que se vai aumentando a quantidade de combustível injetada no motor. Estes resultados eram esperados pois, sendo a posição do acelerador controladora da injeção de combustível no motor, tem-se que a potência gerada pelo motor será superior, deste modo o hélice terá uma rotação superior de tal modo que a velocidade, que a semirrígida atingirá, será consequentemente superior. Assim para um percurso semelhante, quanto maior for a velocidade menor será o tempo que a semirrígida leva a fazer o trajeto, e maior será o consumo por minuto.

Durante os testes a maior dificuldade foi na medição da quantidade de combustível no depósito no início e no final de cada ensaio, pois o abanar da semirrígida dificultava esta tarefa.

Para ser mais perceptível a variação do consumo em cada condição testada, converteu-se os dados de consumo por teste em consumo horário, obtendo-se as tabelas representadas no Apêndice 23. Não é possível dizer-se, à partida, que um hélice é melhor do que outro, pois numa análise muito superficial não existe nenhum que se destaque em relação aos outros. Existem sim, hélices que para uma determinada condição de carga e regime de rotação têm um consumo inferior aos outros, mas este destaque no consumo não pode ser aplicado a todas as condições a que o hélice fica sujeito. Assim na Tabela 1, estão representados os hélices mais económicos para cada condição de carga e regime de rotações, sem se entrar em linha de conta com a altura de maré e com o estado da maré.

		Condições de carga		
		A (0 Kg)	B (100Kg)	C (200Kg)
Posição do acelerado	1	Hélice 4	Hélice 3	Hélice 1
	2	Hélice 4	Hélice 4	Hélice 4
	3	Hélice 1	Hélice 4	Hélice 2
	4	Hélice 4	Hélice 3	Hélice 1

Tabela 7 - Hélice mais eficiente para cada condição de carga e regime de rotações

É notável que o hélice 4 consegue ter melhor eficiência na maior parte dos testes, mas em algumas condições especiais, as características do hélice 4 não são as mais favoráveis para a obtenção dos menores consumos. Sendo assim, prevê-se que as características predominantes, para um hélice económico, pertencem ao hélice 4.

6.1.1 Sugestão de melhorias para trabalhos futuros

A resolução desta parte prática não foi de todo fácil, por mais planeamentos que se façam nunca se consegue englobar todas as variáveis inerentes a um trabalho experimental. No caso dos testes com a semirrígida na bacia de manobra da BNL, pode-se dizer que a escolha do peso que cada saco de plástico continha, para fazer a variação da carga da semirrígida, foi muito ambicioso e causou muitos problemas. Para se melhorar este procedimento dever-se-á reduzir o peso dos sacos para 10 Kg, isto irá facilitar o seu transporte. Outra dificuldade encontrada nesta fase de testes foi a semirrígida que estava planeada ser utilizada ter avariado e a semirrígida, que foi de facto utilizada na resolução dos testes, necessitar de haver uma conciliação entre as aulas do CNOCA e os testes.

Assim para trabalhos futuros sugere-se que, dentro das possibilidades, exista uma semirrígida só dedicada à execução destes testes, de modo a que se possam testar mais condições.

A principal dificuldade encontrada na resolução dos testes foi a medição da quantidade de combustível presente no depósito, pois o abanar da semirrígida com a ondulação dificultava a leitura e em algumas alturas era quase impossível ter-se resultados, muito precisos, pois o motor só consumia o que estava na linha de combustível. Para esta medição ser mais precisa a única solução plausível é a instalação de um sensor que dê o consumo médio do ensaio.

No que diz respeito às condições ambientais, descurou-se muito durante a resolução do planeamento pois supunha-se que não iriam surtir tanto efeito nos testes como tiveram. Assim de futuro incluir nos testes o cálculo da direção do vento e da intensidade, pois esta variável era a que mais se fazia sentir durante os testes.

Por fim o entrave que impossibilitou que fosse possível conciliar o consumo com a velocidade foi a falta da utilização de um GPS que medisse a distância de cada ensaio. Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a utilização de um GPS para se conseguir a relação entre a velocidade e consumo dos vários hélices.

6.2 Testes com o MATLAB

Esta secção de discussão de resultados tem como principal objetivo demonstrar todos os passos efetuados e os resultados obtidos durante o treino da rede neuronal. Deste modo tem-se que esta secção está dividida em normalização dos dados, seleção da arquitetura da rede, aplicação da rede e comparação com os resultados obtidos na secção anterior.

6.2.1 Normalização dos dados

Como foi referido no subcapítulo 3.1 (processamento de dados) do capítulo 3 referente às redes neuronais, é necessário que os dados sofram um pré-processamento antes de serem utilizados na criação de uma rede neuronal. No processo de normalização dos dados foi utilizada a normalização através da distribuição de Gauss e a distribuição uniforme, utilizando para as variáveis tempo, consumo e altura de maré a distribuição de Gauss e para as variáveis passo, diâmetro, posição do acelerador, peso e estado da maré

a distribuição uniforme. Como as variáveis passo, diâmetro, posição do acelerador, peso e estado da maré seguem uma probabilidade uniforme, querendo dizer que qualquer valor no intervalo entre o máximo e o mínimo de cada variável tem a mesma probabilidade de ocorrer, assim a normalização destas variáveis fez-se de maneira que a média fosse o resultado médio entre o valor máximo e o valor mínimo, possível para a variável, que está a sofrer normalização. Como a dispersão dos dados é uniforme para ambos os lados da média o valor do desvio padrão é a distância entre o valor máximo/mínimo e o valor médio. Para as variáveis estado da maré e número de pás é assumida uma normalização gaussiana na qual ambos os estados da variável têm a mesma probabilidade de ocorrer. Isto acontece porque ambas as variáveis são discretas e só apresentam 2 valores, o estado de maré assume o valor 1 quando a maré, no momento em que se estava a executar o teste, estava a encher e apresenta o valor 0 quando a maré, durante o teste estava a vaziar. A variável número de pás assume os valores 3 ou 4, sendo 3 ou 4 o número de pás que o hélice que estava a ser testado tinha. Na normalização dos tempos e dos consumos como não é conhecida a sua distribuição de probabilidades, foram tidos em linha de conta todos os dados recolhidos, calculando-se a média aritmética dos valores recolhidos e o seu desvio-padrão. Na normalização da altura da maré foram tidos em linha de conta as alturas máximas, mínimas e a média das alturas máximas e mínimas para cada estado de maré, posteriormente calculou-se a média aritmética e o desvio-padrão da altura de marés.

Com as médias e os desvios-padrão de cada variável procedeu-se à normalização dos dados. É possível observar-se no Apêndice 30, a tabela que contempla as médias e os desvios-padrão obtidos para cada variável. Nos Apêndice 31, Apêndice 32, Apêndice 33 e Apêndice 34, é possível observar os resultados da normalização dos vários dados recolhidos.

6.2.2 Seleção da arquitetura da rede

Como os pesos de cada ligação e os termos de cada neurónio são iniciados cada vez que se treina uma nova rede neuronal, a divisão do conjunto de dados é feita aleatoriamente no início do treino para cada combinação da rede e só se treina a rede uma vez, os valores do erro de teste podem não corresponder ao erro mínimo para uma determinada combinação. Assim para se conseguir analisar qual é a arquitetura vencedora, executou-se o código que cria todas as combinações de redes e guarda os erros

das mesmas combinações (Apêndice 35), cinco vezes, este código está presente no Apêndice 35 e o resultado das várias experiências está presente no Apêndice 37. O Apêndice 37 apresenta os erros de teste mínimo que foram registrados nas cinco vezes que foi executado o código presente no Apêndice 35. As arquiteturas que mais se destacam no Apêndice 37 por apresentarem o menor erro de teste, ao longo das cinco experiências são apresentadas na Tabela 8.

Arquitetura	A	B	C
Função de Treino	1	2	3
Função de transferência de saída	1	1	1
Função de transferência da camada intermédia	1	1	1

Tabela 8 - Arquiteturas vencedoras

Estas arquiteturas foram escolhidas pois no conjunto das cinco experiências, estas arquiteturas são assinaladas como terem um dos três menores erros de teste em pelo menos duas experiências. No preenchimento da Tabela 8, teve-se em conta a comparação entre os erros de teste e os erros de validação para cada arquitetura, caso o erro de teste seja superior ao erro de validação elimina-se essa arquitetura pois a rede não está a conseguir responder à apresentação de novos dados com a mesma eficiência que fez com os dados de validação. Através da análise do Apêndice 38, em todas as arquiteturas o erro de validação é superior ao erro de teste, assim não se elimina nenhuma das arquiteturas através da comparação dos erros. Verifica-se também que na experiência 3 e experiência 4, para a arquitetura em que é utilizada a função de treino 3 e as funções transferência de saída e de camada 1, o número de neurónios a serem utilizados é superior ao número de variáveis de entrada, o que pode significar que a rede está a segmentar muito o processamento dos dados, estando a criar uma linha particular de resposta para certos dados de entrada, deste modo, estas arquiteturas têm que ser eliminadas do conjunto em estudo. Através desta exclusão desenhou-se a Tabela 8, na qual é possível observar as três arquiteturas que apresentam o menor erro de teste, em que este é inferior ao erro de validação e o número de neurónios onde se obtém o erro de teste mínimo é igual ou inferior ao número de variáveis de entrada. Analisando a Tabela 8, é notório que as funções transferência da camada intermédia e da camada de saída se repetem nas três arquiteturas vencedoras, assim pode-se assumir que estas funções de transferências são as vencedoras pois são as que conseguem atingir um erro inferior. No Apêndice 38,

repara-se que a arquitetura que mais se repete em termos de obter o menor erro de teste e que obtém o menor erro de teste no conjunto das cinco experiências nas várias arquiteturas, é a arquitetura em que a função de treino e as funções de transferência são 1. Poder-se-ia dizer que, desta forma a arquitetura vencedora era a arquitetura A, mas para se garantir que não existe nenhuma combinação de divisão dos dados, nos diversos conjuntos, que atinja um menor erro de teste nas outras arquiteturas e que não tenha sido testado, nas cinco experiências anteriores, criou-se uma linha de código que corre todas as combinações de neurónios para a mesma arquitetura de rede e guarda os erros de teste (Apêndice 35).

Para cada arquitetura vencedora a linha de código foi executada dez vezes, e os resultados obtidos foram passados para gráficos do erro, em função do número de neurónios na camada intermédia. O erro de teste mínimo de cada experiência, apresenta uma ordem de grandeza superior à do erro mínimo obtido na análise anterior, assim é necessário voltar a executar o programa, de forma que o erro mínimo da rede treinada seja igual ou inferior ao erro obtido no Apêndice 38. Para que o programa pare quando o erro mínimo da rede treinada for inferior a 0,06, utiliza-se um ciclo “*while do*”

while mínimo > 0,06

Em que a variável mínimo é o valor mínimo do erro de teste para a rede que foi treinada. Após se executar a linha de código presente no Apêndice 39, para a arquitetura A, e desenhar-se os dez gráficos os quais representam os erros de teste em função do número de neurónios, para as diferentes combinações aleatórias de pesos, termos de cada neurónio e divisão dos dados obtém-se os gráficos presentes no Apêndice 40. A análise do Apêndice 40, permite verificar que para se obter o menor erro de teste, utilizando no treino da rede neuronal a arquitetura A, a camada intermédia deverá apresentar 2, 3, 4 ou 6 neurónios. Dentro destas três possibilidades de número de neurónios a que apresenta o menor erro é a rede cujo número de neurónios na camada intermédia é 4 e atinge um erro de teste de 0,03175.

De seguida executou-se as mesmas dez experiências com a arquitetura B e com a arquitetura C. Na análise dos resultados obtidos do erro de teste para a arquitetura B, variando o número de neurónios na camada intermédia, chegou-se à conclusão que o erro de teste mínimo aparece quando a camada intermédia da arquitetura B é composta por 4

neurónios, sendo o erro obtido de 0,05103 (Apêndice 41). Segundo os gráficos apresentados no Apêndice 42, verifica-se que o erro de teste mínimo de 0,03567, para a arquitetura da rede C, é obtido com um número de neurónios na camada intermédia igual a 3. Como os erros de teste mínimo das arquiteturas B e C são superiores ao erro de teste mínimo obtido utilizado a arquitetura de rede A, conclui-se que a arquitetura A consegue treinar uma rede mais eficiente do que as arquiteturas B e C.

Para verificar se uma rede formada por uma única camada intermédia de neurónios obtém melhores resultados que uma rede formada por duas camadas intermédias, foram recolhidos os valores dos erros de teste mínimos das várias combinações de neurónios pertencentes às duas camadas intermédias. Para os testes, foram utilizadas todas as possibilidades de arquitetura de rede e o número de neurónios em cada camada intermédias varia entre 1 e 10. A função de transferência utilizada é a mesma para as duas camadas intermédias, variando entre a mesma gama utilizada nos treinos para uma só camada intermédia, bem como a gama de variação da função de treino e função de transferência da camada e de saída. Dentro dos erros de teste mínimos anteriormente recolhidos, foram selecionadas as cinco arquiteturas que apresentam os menores erros (Apêndice 43). Das cinco arquiteturas selecionadas verifica-se que as funções de transferência da camada intermédia e camada de saída, que obtém valores de erro menor, são as mesmas observadas nos testes com uma só camada, desta forma conclui-se que estas, funções de transferência, são as que melhor se adequam, dentro das que foram analisadas, a este tipo de problemas, independentemente do número de camadas intermédias e número de neurónios. Comparando os valores obtidos para a rede treinada com duas camadas intermédias com os valores obtidos do treino da rede com uma camada intermédia, verifica-se que o treino com uma camada intermédia apresenta erros de teste menores, que a rede treinada com duas camadas intermédias. Com isto, pode-se concluir que quanto ao número de camadas, para o caso em análise, uma rede com uma camada intermédia de neurónios apresenta uma melhor eficiência no treino da rede.

De forma a provar que a rede neuronal com a arquitetura A e com 4 neurónios na camada intermédia é o tipo de rede mais eficiente dentro das quatro possibilidades de conjuntos de neurónios, treinou-se a rede várias vezes para a arquitetura A, com o objetivo do erro de teste obtido ser inferior a 0,039, este processo foi repetido durante 5 experiências. Para tal utiliza-se a linha de código presente no Apêndice 44, quando o erro

de teste da rede que está a ser treinada é inferior a 0,039 a linha de código grava o valor dos pesos e termo de cada neurónio num vetor que por sua vez é armazenado numa matriz. O erro base escolhido foi 0,039, pois para qualquer uma das quatro possibilidades de número de neurónios, o erro de teste mínimo atingido é inferior ao erro base, segundo o Apêndice 40. Assim, garante-se que pelo menos existe uma possibilidade de combinação de pesos, termos e divisão dos conjuntos de treino, teste e validação em que o valor do erro é inferior a 0,04, desta forma garante-se que a linha de código não vai trabalhar infinitamente. O resultado das cinco experiências, dos erros de teste para os vários números de neurónios, está presente no Apêndice 45, verifica-se que o erro de teste mínimo é obtido com o número de neurónios na camada intermédia igual a três. Assim a arquitetura vencedora é composta por uma função de treino de Levenberg-Marquardt, a função de transferência na camada intermédia é a sigmoide tangente hiperbólica, cujo seu algoritmo é,

$$e = \text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + \exp^{-2 \times g}} - 1$$

Equação 16 - Algoritmo da função sigmoide tangente hiperbólica

Em que:

- e corresponde ao valor de saída da função;
- g corresponde ao valor de entrada na rede;

A função de transferência, vencedora, dos neurónios na camada de saída é uma função linear e o número de neurónios pertencentes à camada intermédia é igual a três.

De forma a verificar se é possível eliminar alguma das variáveis de entrada, procedeu-se à análise dos pesos de cada conexão das variáveis de entrada aos neurónios da camada intermédia (Apêndice 46), através da linha de código

`[termo, pesosentrada, pesossaida] = separatewb(net, wb2)`

Equação 17 - Linha de código para separar os pesos

Desta análise conclui-se que todas as variáveis de entrada têm um peso significativo para o resultado final da rede. Apesar disto a variável altura de maré não apresenta uma grande variação nos pesos, o que significa que cada neurónio está a dar quase a mesma importância a esta variável. De forma a determinar se este peso pode ser

ou não desprezável, treinou-se a rede com a arquitetura vencedora na qual foram utilizadas todas as variáveis de entrada à exceção da altura de maré, e comparou-se o erro de teste mínimo da rede treinada com alturas de marés e sem alturas de marés. No final, o erro mínimo obtido para uma rede treinada sem a variável altura de maré foi 0.0217, o que é superior ao erro de teste quando a rede é treinada com alturas de marés. Durante os testes na bacia de manobra, a direção do vento e a sua intensidade, eram as condições ambientais que mais se faziam sentir, eventualmente criaram uma incoerência nos dados recolhidos. Havendo estas incoerências nos dados recolhidos, devido ao efeito do vento, e como não se recolheram estas variáveis, a rede neuronal tenta arranjar uma correlação para estas incoerências através dos dados das alturas das marés. Sendo assim não se pode desprezar nenhuma das variáveis de entrada.

6.2.3 Aplicação da rede

Para pôr em prática a rede neuronal, anteriormente treinada, foi utilizada a linha de código presente no Apêndice 47. Este programa guarda os valores referentes ao tempo e consumo normalizados e não normalizados, também calcula e guarda o consumo horário para cada conjunto de variáveis de entrada. Foi analisada a eficiência de 32 hélices diferentes, os quais eram a combinação de todas as características dos hélices utilizados para a recolha de dados, para cada combinação de carga e posição do acelerador. As características dos hélices, combinadas foram o passo (9, 12,13 ou 14), diâmetro (10,1; 10,3; 11,75; 12,25), e número de pás (3 ou 4), para as outras variáveis de entrada fez-se combinações entre a posição do acelerador (1, 2, 3 ou 4), a condição de carga (carga inicial, mais 100 Kg ou mais 200 Kg), estado da maré (encher ou a vazar) e por último a altura da maré (0,9; 2,25; 3,5).

Após se ter criado uma matriz de oito dimensões, a qual engloba todas as variáveis de entrada e os cinco dados de saída gerados pela linha de código anterior, foi utilizada a linha de código presente no Apêndice 48, de forma a obter-se o valor do consumo mínimo, para cada regime de rotação em função da carga, para cada altura de maré e estado de maré. Desta forma foi possível determinar qual é o hélice, segundo a rede neuronal, mais económico para cada regime de rotação em função da carga em cada condição de altura de maré e estado de maré, os resultados dos hélices que apresentam o menor consumo estão presentes no Apêndice 49. Os valores de saída do consumo horário do motor, variam

consoante a altura de maré e o estado de maré, mas no conjunto das seis tabelas é possível observar que os hélices escolhidos como mais económicos, pela rede, são um hélice com passo 14'', diâmetro 10,1'' e 3 pás (hélice I), um hélice cujas características são 9'' de passo, 10,1'' de diâmetro e 3 pás (hélice II) e por último um hélice constituído por 12'' de passo, 10,1'' de diâmetro e 3 pás (hélice III). Verifica-se que para os três hélices mais económicos, o diâmetro do hélice corresponde ao menor diâmetro estudado durante a fase de provas na bacia de manobras. Estes resultados eram esperados, pois para a mesma condição de injeção de combustível, quanto menor for o diâmetro do hélice, menor a resistência oferecia pelo mesmo ao binário gerado pelo motor, o que resulta num aumento da resultante das forças aplicadas à massa de água que passa pelo hélice. Quanto ao número de pás, os três hélices selecionados pela rede são dotados de três pás, este resultado dá-se pois a área da pá dos hélices com três pás é superior à área das pás dos hélices com quatro pás, sendo que quanto maior a área do hélice mais quantidade de água é movimentada através do hélice.

Através da análise do Apêndice 49, verifica-se que o hélice I é o hélice mais económico para um maior número de possibilidades de posições do acelerador do motor e de carga da semirrígida e para as diversas alturas de maré e estado de maré analisadas. Estes resultados devem-se, para além do que foi referido em cima sobre o diâmetro do hélice e do número de pás, também ao avanço por rotação deste hélice, pois assim com um maior avanço por rotação e melhor aproveitamento do binário gerado pelo motor, a semirrígida percorreu, aproximadamente, o mesmo espaço em menos tempo, diminuindo assim o consumo. É possível verificar-se que para o regime de rotação 1, para a condição de carga inicial e para a altura de maré média o hélice que menor consumo apresenta é o hélice III, para as restantes condições de carga, alturas de maré e estado de maré, o hélice mais eficiente é o hélice II. Estes hélices obtêm melhores resultados nestas condições que o hélice I pois, como o passo é menor e, por sua vez, o ângulo de ataque das pás também é menor, a resultante das forças aplicadas na massa de água, que passa pelo hélice, é mais paralela ao eixo de rotação do hélice, o que resulta numa maior força de impulsão, um menor avanço do hélice em cada rotação, mas um consumo inferior quando comparado com o hélice I.

		Estado de maré - Vazar					Estado de maré - Encher		
		Condição de carga					Condição de carga		
		A	B	C			A	B	C
Posição do acelerador	1	Hélice II	Hélice II	Hélice II	Posição do acelerador	1	Hélice II	Hélice II	Hélice II
	2	Hélice I	Hélice I	Hélice I		2	Hélice III	Hélice I	Hélice I
	3	Hélice I	Hélice I	Hélice I		3	Hélice I	Hélice I	Hélice I
	4	Hélice I	Hélice I	Hélice I		4	Hélice I	Hélice I	Hélice I

Tabela 9 - Tabela resumo dos hélices mais económicos para as várias combinações de carga e posição do acelerador caso o estado de maré esteja a encher ou a vaziar

Resumindo os quadros presentes no Apêndice 49, obtém-se a Tabela 9, na qual é possível observar qual será o hélice mais económico para cada combinação de posição do acelerador e carga na semirrígida, para os dois estados de maré, independentemente da altura da maré.

6.2.4 Comparação dos resultados

No final do capítulo 6.1, foi dito que possivelmente o hélice que iria apresentar menores consumos seria um hélice composto por algumas características do hélice 4 (4 pás, 10,3'' X 13''). O que não foi possível verificar, pois o hélice I (3 pás, 10,1'' X 14'') não tem nenhuma característica do hélice 4.

Para a comparação entre os consumos obtidos nos testes, com o hélice padrão, e os consumos que eventualmente se iria obter com os hélices resultantes da rede neuronal, criou-se a Tabela 10, na qual estão representados os consumos obtidos durante os testes com a semirrígida na bacia de manobras da BNL, para o hélice com três pás, 11,75'' (29,845 cm) de diâmetro e 12'' (30,48 cm) de passo.

		Testes BNL		
		Condições de carga		
		A (0 Kg)	B (100Kg)	C (200Kg)
Posição do acelerado	1	2,38 l/h	4,81 l/h	2,24 l/h
	2	7,98 l/h	6,6 l/h	6,12 l/h
	3	7,8 l/h	10 l/h	8,9 l/h
	4	11,28 l/h	11,92 l/h	10,67 l/h

Tabela 10 - Consumos mínimos obtidos nos testes com a semirrígida

Para se obter os consumos mínimos resultantes da rede neuronal, selecionou-se dentro dos hélices presentes na Tabela 9, os mais económicos independentemente do

estado da maré resultando assim a Tabela 11, a estes valores está associado um fator de erro que só será possível calcular quando se fizer testes ao conjunto de hélices resultante da análise da rede neuronal.

		Resultados Rede neuronal		
		Condições de carga		
		A (0 Kg)	B (100Kg)	C (200Kg)
Posição do acelerado r	1	1,29 l/h	1,31 l/h	1,51 l/h
	2	2,7 l/h	2,6 l/h	2,54 l/h
	3	4,76 l/h	4,74 l/h	4,59 l/h
	4	8,03 l/h	7,9 l/h	7,81 l/h

Tabela 11 - Consumos mínimos obtidos através da rede neuronal treinada

Na Tabela 12, é possível observar-se a diferença dos consumos mínimos entre os resultados obtidos através dos testes com a semirrígida e os resultados obtidos através da análise da rede neuronal. Verifica-se, caso sejam comprovados os valores do consumo mínimo obtidos através da análise da rede neuronal, que existe uma diferença substancial entre os hélices em comparação. Sendo que utilizando os hélices resultantes da análise da rede neuronal será possível poupar mais combustível, após várias horas de utilização.

		Diferença de consumo entre testes com a semirrígida e com os resultados obtidos da rede neuronal		
		Condições de carga		
		A (0 Kg)	B (100Kg)	C (200Kg)
Posição do acelerado r	1	1,09 l/h	3,5 l/h	0,73 l/h
	2	5,28 l/h	4 l/h	3,58 l/h
	3	3,04 l/h	5,26 l/h	4,31 l/h
	4	3,25 l/h	4,02 l/h	2,86 l/h

Tabela 12 - Diferença de consumo

6.2.5 Sugestão de melhorias para trabalhos futuros

A resolução de toda a parte pertencente às redes neuronais foi de facto muito desafiante. Como sugestão para melhoria de trabalhos futuros, dentro da área das redes neuronais, deve-se entrar em linha de conta com um período de tempo alargado para o entendimento do funcionamento de uma rede neuronal e dentro deste tempo praticar com problemas simples.

De modo a reduzir o número de saídas e a quantidade de cálculos intermédios, feitos para o cálculo do consumo horário, em trabalhos futuros é sugerido que seja

reduzido o número de saídas a uma só que será o consumo horário em vez de se ter uma saída para o consumo, em cada teste, e outra saída do tempo demorado durante o percurso.

Por fim, a busca da rede que melhor se ajusta ao problema que se está a analisar, requer algum tempo computacional pois, apesar do tempo de computação de uma arquitetura ser relativamente curto, quando se entra em linha de conta com todas as combinações possíveis o tempo de computação sobe exponencialmente. De tal forma que em trabalhos futuros, os parâmetros que se tenciona variar na rede serem sujeitos a um processo de seleção.

Conclusão

Com o que foi exposto no Capítulo 1 conclui-se que o estudo dos hélices é uma ciência que é analisada há mais de 2000 anos, e que todos esses estudos contribuíram para construir o conhecimento sobre os hélices e sem o qual não seria possível ter os hélices que se conhece nos dias de hoje. Foi possível observar que devido à sua complexidade não existe o estudo detalhado da escolha de um hélice customizado para um determinado navio ou embarcação. Da informação recolhida percebe-se que os grandes fabricantes de hélices utilizam a experiência acumulada e testes aos hélices para produzirem uma gama de hélices que se aplicam a qualquer casco de embarcações miúdas. Já em navios o racional pode ser diferente. Através do Capítulo 2 é possível entender-se, para além do funcionamento de um motor de combustão interna e constituído um motor fora de borda, que existe uma relação entre o hélice escolhido e o motor que equipa uma determinada embarcação de modo a otimizar a conversão de energia pela queima de combustível em impulsão, em condições nominais de utilização. Esta otimização não entra em linha de conta nem com a resistência do casco nem com as condições climáticas que possam provocar mais resistência (que também são consideradas no projeto de hélices). Esta dissertação de mestrado teve como principal intuito evitar todos os estudos que servem para a criação de um hélice e os estudos que existem da relação hélice motor, de tal modo que os hélices selecionados no final deste trabalho serão os indicados para a semirrígida que foi estudada consoante as condições climáticas.

O Capítulo 3, desta dissertação de mestrado, tem como principal objetivo a simplificação do conceito de rede neuronal explicando algumas das principais preocupações que é necessário ter-se quando se treina uma rede neuronal. Estas preocupações são o processamento dos dados, a divisão dos dados, o *overfitting* e o modelo de rede neuronal que pode ser escolhido. Para elaboração do planeamento dos testes com a semirrígida na bacia de manobra da BNL, presente no Capítulo 5.1, foi utilizada como base a doutrina da Marinha do Brasil, relativamente aos cadernos de provas, doutrina esta que está sucintamente explicada no Capítulo 4. Esta doutrina pretende que seja criado um caderno de prova que contenha toda a informação sobre o planeamento dos testes, de tal modo que seja possível reproduzir os mesmos testes por outra entidade e obter-se e validar-se os novos dados amostrais.

Foi possível concluir-se que de entre os quatro hélices testados, o hélice 4 (4 pás, 10,3'' X 13''), no geral, é apontado como o que apresenta um menor consumo, num maior número de casos, como se verifica através da análise da tabela 7, presente no Capítulo 6.1.

Dos estudos feitos, para se determinar qual a arquitetura de rede que melhor se adaptava à resolução deste problema, concluiu-se que a arquitetura que apresentava um erro dos dados de teste menor, é uma rede neuronal composta por uma só camada intermédia, a qual por sua vez é composta por 3 neurónios sendo que o algoritmo de treino utilizado é o de Levenberg-Marquardt, a função de transferência na camada intermédia é a função sigmoide tangente hiperbólica e a função de transferência dos neurónios na camada de saída é uma função linear. Resultados estes que também foram obtidos pelo camarada Cardoso da Silva nos seus estudos, e que poderá querer dizer que esta arquitetura é a que melhor se adequa a este tipo de problemas. Ao aplicar a rede conclui-se que o hélice que apresenta menores consumos não tem nenhuma das características pertencentes ao hélice 4, este novo hélice é composto por um passo 14'', diâmetro 10,1'' e 3 pás.

Com o estudo feito no Capítulo 6.2.4, conclui-se que, caso os resultados dos consumos obtidos pela rede neuronal sejam confirmados através de testes práticos, a metodologia aplicada nesta dissertação de mestrado obtém consumos inferiores aos registados com o hélice padrão e em média poupar-se-ia 3,41 l/h de combustível, caso se utiliza-se os hélices resultantes do estudo.

Trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros, tem-se:

- Utilizar-se a série dos hélices como uma variável de entrada da rede de modo que a recriação dos hélices ideais seja a mais exata possível;
- Incorporar um GPS durante os ensaios, de modo a que seja possível através desta metodologia estudar-se a relação consumo – velocidade;
- A adaptação de um sistema que ligue o motor à distância;
- A adaptação de um sistema de governo autónomo, que através da utilização de válvulas hidráulicas atuadas eletricamente faz a alteração do governo do navio, e que seja comandado a bordo ou à distância;
- Fazer-se um estudo dos componentes eletrónicos que a plataforma terá que ter, de modo que a plataforma não necessite uma pessoa embarcada para operar.

Bibliografia

- Alves , E. A. (Novembro de 2011). Concepção de uma pequena turbina eólica destinada ao segmento doméstico.
- Barry, C. (Fevereiro de 2005). *Propeller Selection For Boats and Small Ships*. Obtido em Abril de 2015, de Davis&Co. Ltd.: https://www.daviscoltd.com/Engineering/documents/PDFs%20Chris%20Barry/Hydrodynamics/Propeller_course.pdf
- BBlades professional propellers. (s.d.). *Props 101*. Obtido em 3 de Julho de 2015, de <http://bblades.com/props-101/>
- Bergstra, J., & Bengio, Y. (2012). Random Search for hyper-parameter optimization. *Journal of Machine Learning Research* , 281-305.
- Brandner, P. (s.d.). *University of Tasmania*. Obtido em 15 de Fevereiro de 2015, de <https://www.amc.edu.au/news/postgraduate-opportunities-cavitation-research>
- Campos, J. F. (2002). Resistência e propulsão: Apontamentos Teóricos. *Licenciatura em engenharia e arquitetura naval*. Lisboa: Instituto superior técnico-.
- Carlton, J. S. (2012). *Marine Propellers and Propulsion* (3ª ed.). Grã-Bretanha: Elsevier.
- Cientifica, L. N. (s.d.). *Modelos de Redes Neurais*. Obtido em 21 de Outubro de 2015, de http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm1_arquitetura.htm/
- Cortes, B. (2005). *Sistemas de suporte à decisão* (1ª Edição ed.). Lisboa: FCA - Editora de Infomática.
- Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2009). *Neural Network Toolbox™ 6*. EUA: The MathWorks.
- EPI inc. (s.d.). *Brake Mean Effective Pressure*. Obtido em 28 de Novembro de 2014, de http://www.epi-eng.com/piston_engine_technologybmep_performance_varystick.htm
- Escolas de Tecnologias Navais. (2010). *PEETNA2016 - Sistemas de Aperfeiçoamento em Motores fora de Borda "Mercury"*. Alfeite: Marinha.

- Gama, J., Carvalho, A. P., Faceli, K., Lorena, A. C., & Oliveira, M. (2012). *Extração de Conhecimento de Dados - Data Mining*. Lisboa: Editora Sílabo, Lda.
- Guimarães, P. R. (2007). *Métodos Quantitativos Estatísticos*. Curitiba: IESDE Brasil S.A.
- HydroComp, Inc. (s.d.). *Evaluating skewed propellers*. Obtido em 13 de Janeiro de 2015, de <http://hydrocompinc.com/kcoledge/evaluating-skewed-propellers/>
- HydroComp. (s.d.). *Blade Area Ratio Defined: A hydrocomp technical report, report 135*. Obtido em 11 de Fevereiro de 2015, de hydrocompinc: www.hydrocompinc.com/knowledge/library.htm/
- Koziel, S., Ciaurri, D. E., & Leifsson, L. (2011). *Comput. Optimization, Methods and Algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kuiper, G. (1992). *The Wageningen Propeller Series*. MARIN.
- Lawrence, S., & Giles, C. L. (2000). Overfitting and neural networks: Conjugate Gradient and Backpropagation. *International Joint Conference on neural networks*. Italia: IEEE Computer Society.
- Manen, D. (s.d.). *Fundamentals of ship resistance and propulsion: part B propulsion*. Rotterdam: International Shipbuilding progress.
- McCaffrey, J. (s.d.). *How to standardize data for neural networks*. Obtido em 15 de Janeiro de 2015, de Visual Studio Magazine: <https://visualstudiomagazine.com/articles/2014/01/01/how-to-standardize-data-for-neural-networks.aspx>
- Mercury. (s.d.). *Propellers: Everything you need to know and more*. Obtido em 15 de Dezembro de 2014, de www.mercurymarine.com.au/
- Milho, M. I. (2000). *Redes Neurais e Reconhecimento de caracteres*. Lisboa: Instituto Politécnico de Lisboa - Instituto superior de Engenharia de Lisboa.
- Molland, A. F. (Ed.). (2008). *The Maritime Engineering Reference Book: A guide to ship design, construction and operation*. (1ª ed.). Reino Unido: Elsevier.
- Monteiro, J. F. (2001). *Estimadores de máxima verosimilhança para combinação captura - recaptura e trajectos lineares e as suas propriedades*. Évora: Universidade de Évora.

National Park Service. (s.d.). Obtido em 25 de Fevereiro de 2015, de www.nps.gov/safr/learn/historyculture/propsaquaticpark.htm

Silva, R. d. (1953). *Arte Naval Moderna (aparelho e manobra dos Navios)* (3ª ed.). Lisboa: Editorial de Marinha.

Trindade, J. (2012). *Hidrodinâmica e Propulsão*.

Universidade Técnica de Lisboa. (2002). Resistência e Propulsão. (*Apontamentos teóricos*). Lisboa.

Volvo Penta. (1998). *Propellers: Inboard propellers and speed calculation marine engines 2.1L-16L*.

Woodward, J. B. (1976). *Matching Engine and propeller*. Michigan: Universidade de Michigan.

Apêndices

Apêndice 1 - Material necessário para os testes

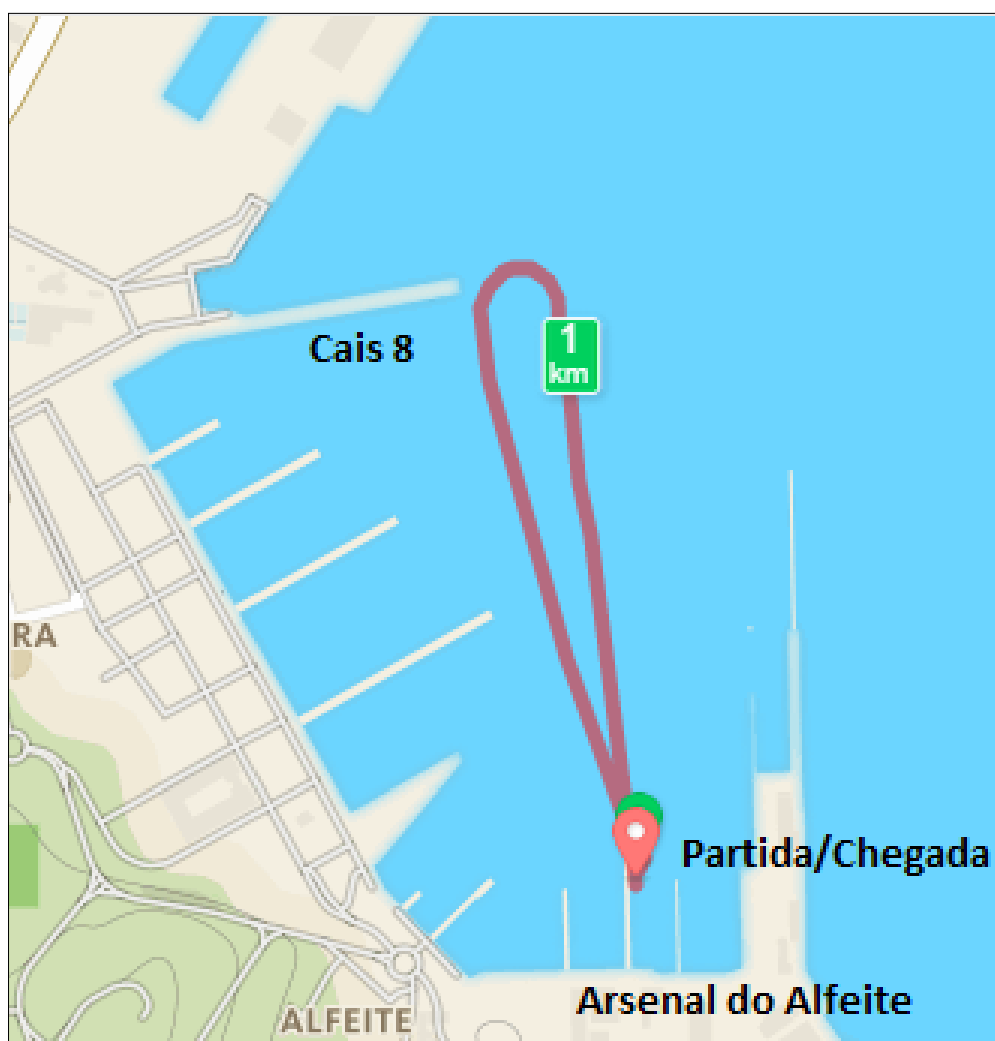
	Semirrígida;
1	Motor fora de borda;
1	Colete de Salvação;
1	Depósito de combustível;
	Gasolina;
1	Corta corrente;
1	Grua;
1	Cabos para levantar a semirrígida na grua;
1	Calço;
1	Berço;
4	Hélices;
2	Modelos de recolha de dados;
1	Álcool Etílico;
1	Pano de limpeza;
1	Vertedor;
1	Caneta de acetato;
1	Cronometro;
2	Rádios VHF;
1	Proteção para o rádio VHF que vai pertencer à semirrígida;
1	Alicate universal;
1	Chave de tubos;
1	Chave de luneta;
	Massa de lubrificação verde.
	Caderno de provas

Apêndice 2 - Fita de Tempo

	1SEMANA							2SEMANA						
Horas	27/abr	28/abr	29/abr	30/abr	01/mai	02/mai	03/mai	04/mai	05/mai	06/mai	07/mai	08/mai	09/mai	10/mai
0900-0930	Aprentamento da semirrigida	A	A	A	FERIADO	FIM DE SEMANA	A	A	A	A		FIM DE SEMANA		
0930-1000		T1ai	T1ciii	T2aiii			T2di	T3bi	T3diii	T4biii				
1000-1030		T1aii	T1civ	T2aiv			T2dii	T3bii	T3div	T4biv				
1030-1100		T1aiii	T1di	T2bi			T2diii	T3biii	TR4	T4ci				
1100-1130		T1aiv	T1dii	T2bii			T2div	T3biv		T4cii				
1130-1330	Almoço						Almoço							
1330-1400	Aprentamento da semirrigida	T1bi	T1diii	T2biii			TR3	T3ci	T4ai	T4ciii				
1400-1430		T1bii	T1div	T2biv				T3cii	T4aii	T4civ				
1430-1500		T1biii	TR2	T2ci			T3ai	T3cii	T4aiii	T4di				
1500-1530		T1biv		T2cii			T3aii	T3civ	T4aiv	T4dii				
1530-1600		T1ci	T2ai	T2ciii			T3aiii	T3di	T4bi	T4diii				
1600-1630		T1cii	T2aii	T2civ			T3aiv	T3dii	T4bii	T4div				
1630-1700		G	G	G			G	G	G	G	G1			

Legenda				
T1	Hélice 3 Pás 11,75'' x 12P	a	0 Kg	
T2	Hélice 4 Pás 10,1'' x 13P	b	100 Kg	
T3	Hélice 4 Pás 10,3'' x 14P	c	200 Kg	
T4	Hélice 3 Pás 12,25'' x 9P	d	300 Kg	
i	Regime de rotação 1	TR2	Troca para o hélice 2	Meter e tirar a semirrigida da água
ii	Regime de rotação 2	TR3	Troca para o hélice 3	
iii	Regime de rotação 3	TR4	Troca para o hélice 4	
iv	Regime de rotação 4			

Apêndice 3 - Percurso principal para os ensaios



Apêndice 4 - Percurso secundário para os ensaios



Apêndice 5 - Caderno de Provas

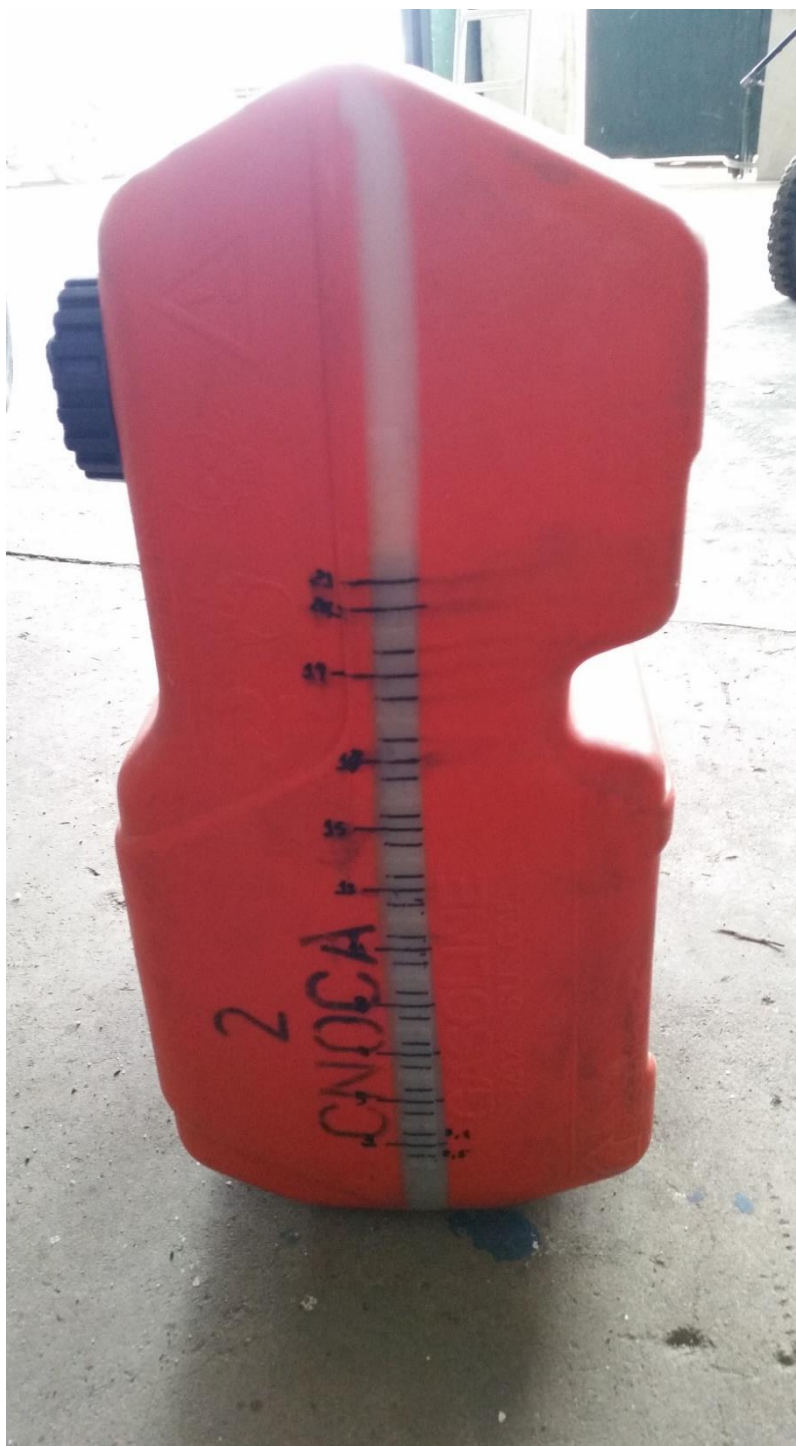
Apêndice 6 - Motor fora de borda Yamaha 30 hp, quatro tempos



Apêndice 7 - Semirrígida utilizada para os testes



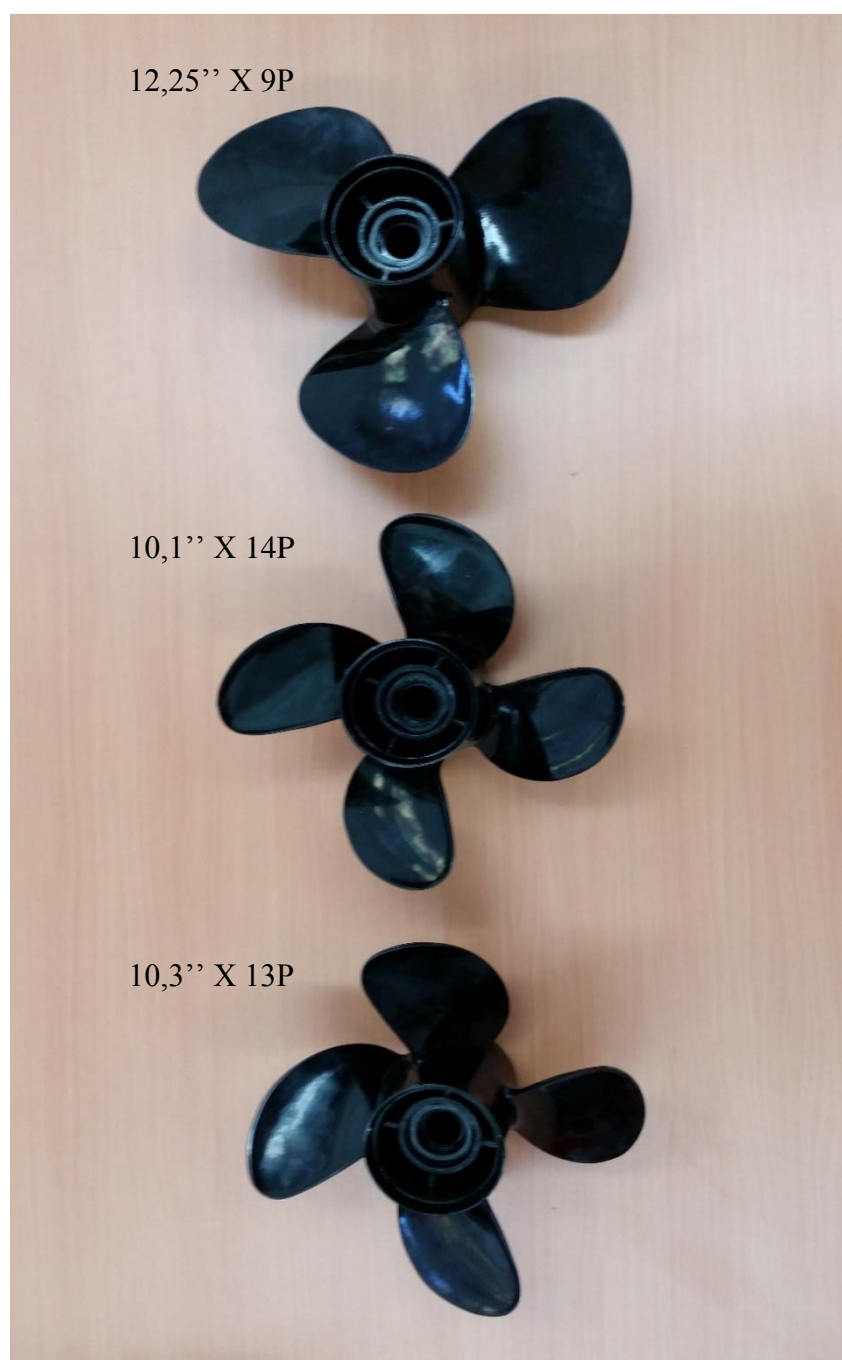
Apêndice 8 - Escala no depósito de combustível



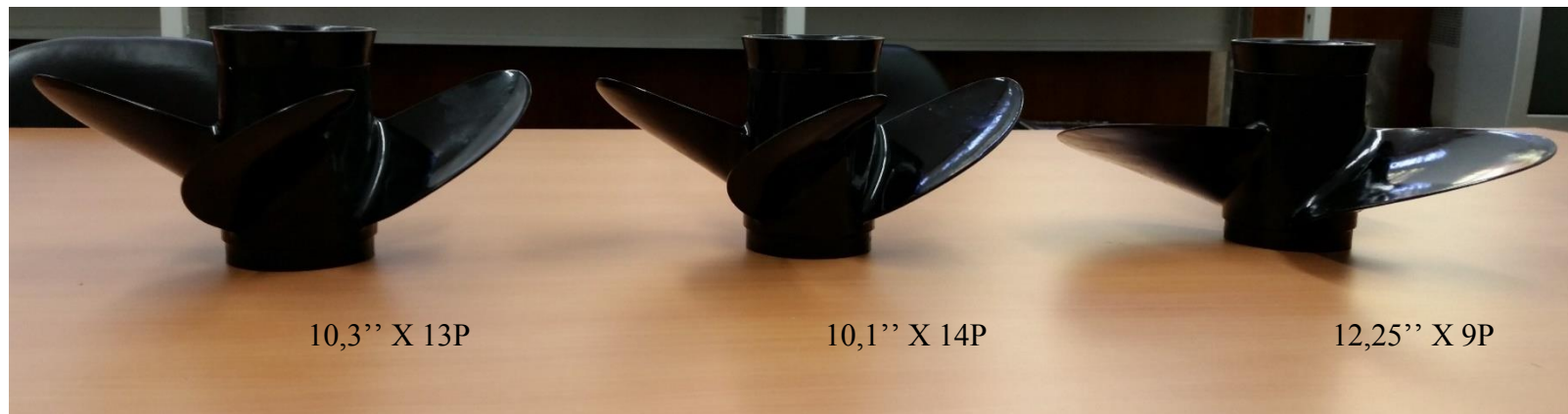
Apêndice 9 - Regimes de Rotação



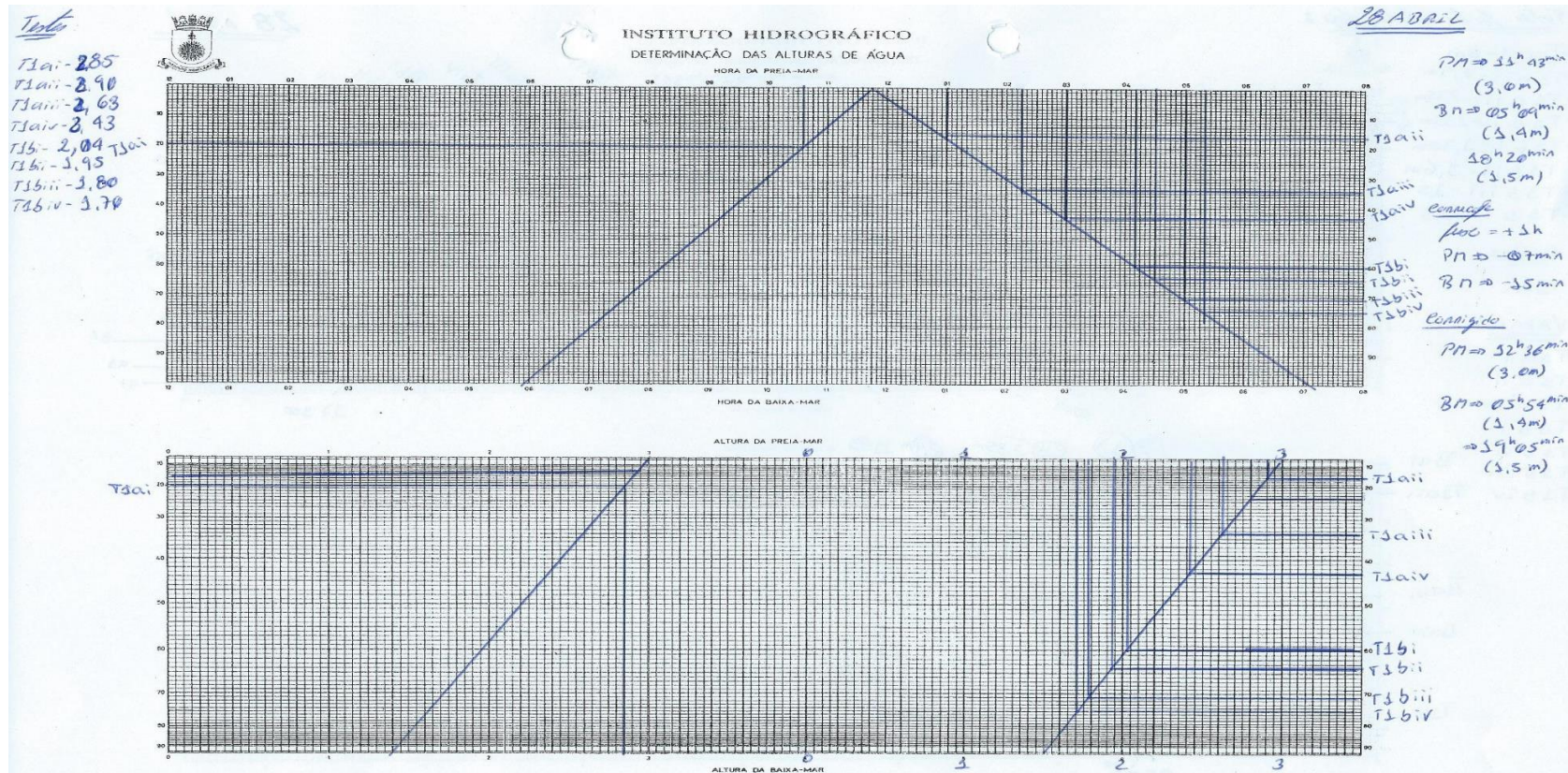
Apêndice 10 - Os três hélice Mercury utilizados (vista por cima)



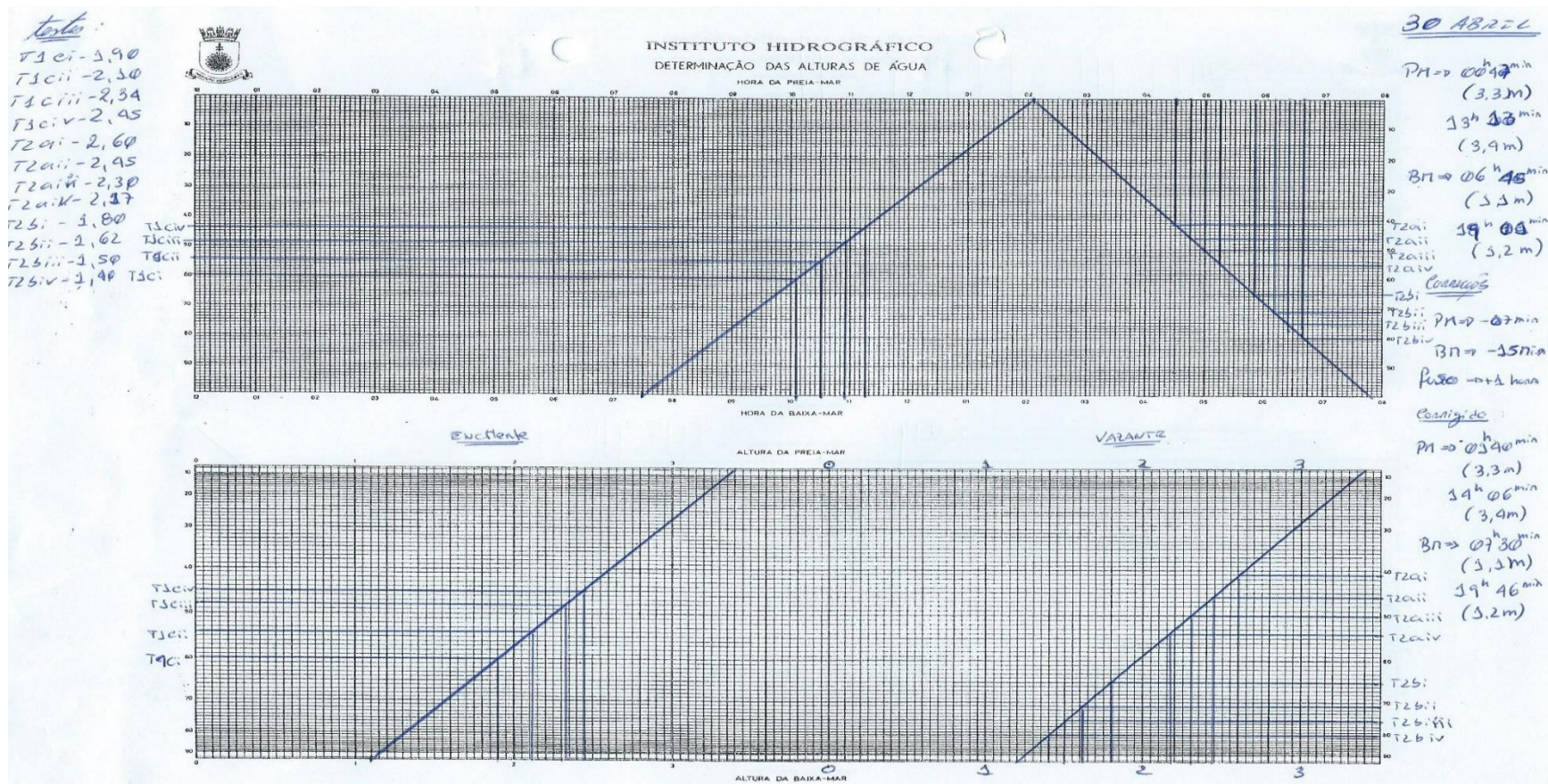
Apêndice 11 - Os três hélice Mercury utilizados (vista lateral)



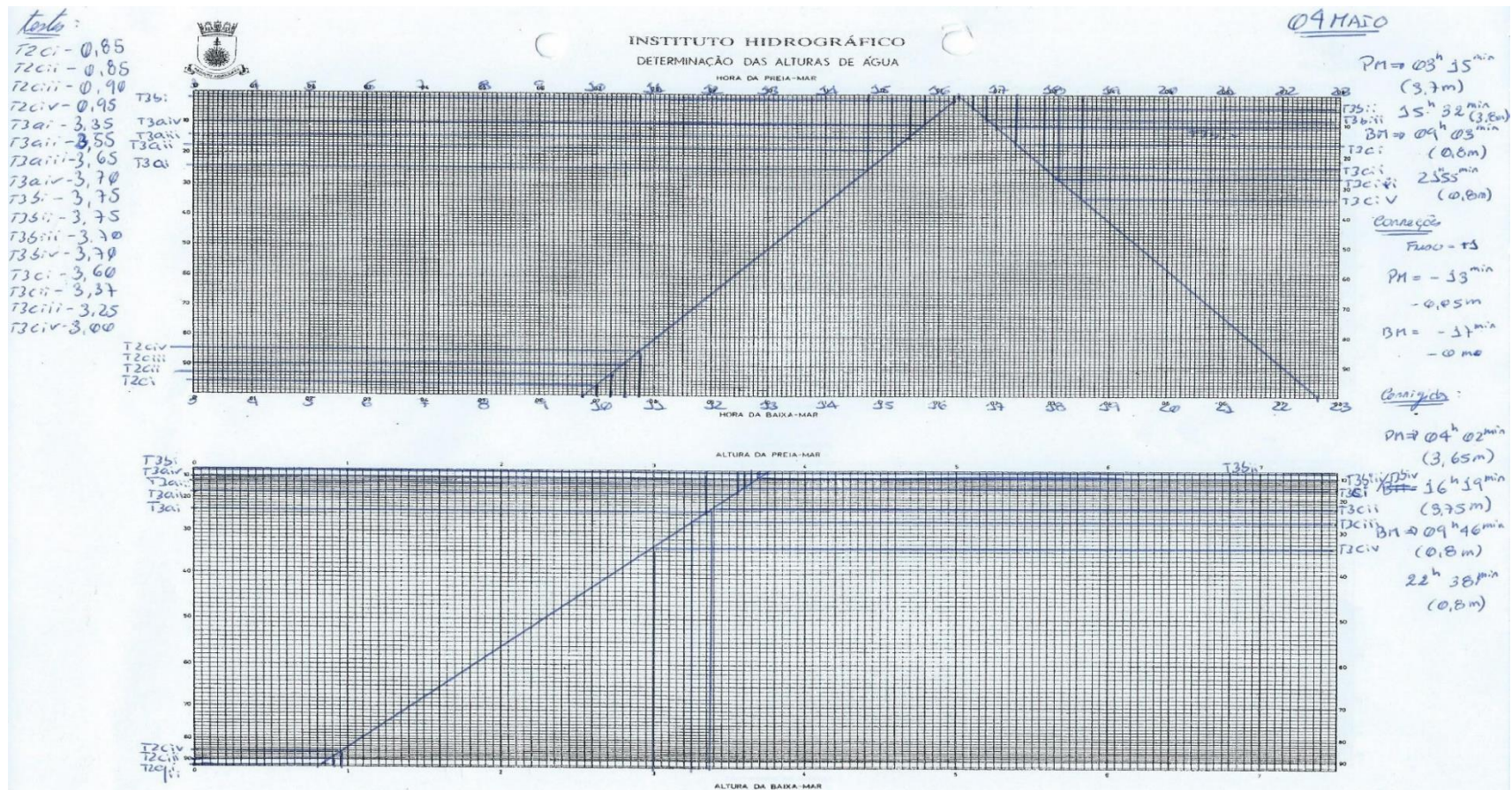
Apêndice 12 – Altura da maré para a BNL no dia 28 de Abril de 2015



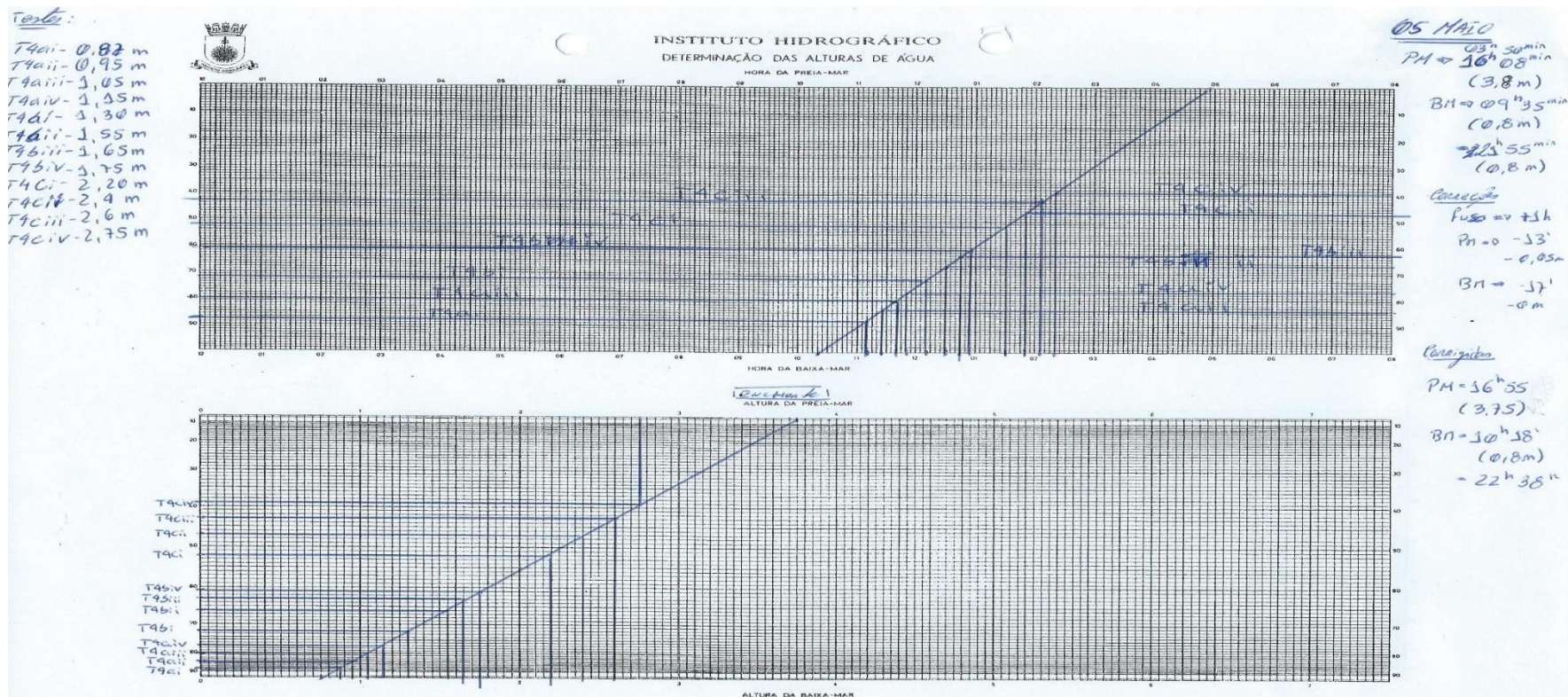
Apêndice 13 - Altura da maré para a BNL no dia 30 de Abril de 2015



Apêndice 14 - Altura da maré para a BNL no dia 04 de Maio de 2015



Apêndice 15 - Altura da maré para a BNL no dia 05 de Maio de 2015



Apêndice 16 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga A

CARGA A							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20	Inicial:	18,8	Inicial:	17,2	Inicial:	16
Final:	19,75	Final:	18,25	Final:	16,5	Final:	15,9
Consumo	0,25	Consumo	0,55	Consumo	0,7	Consumo	0,1
Tempo:	00:08:29	Tempo:	00:03:40	Tempo:	00:03:06	Tempo:	00:02:38
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	19,75	Inicial:	18,25	Inicial:	16,5	Inicial:	15,9
Final:	19,5	Final:	17,75	Final:	16,2	Final:	15
Consumo	0,25	Consumo	0,5	Consumo	0,3	Consumo	0,9
Tempo:	00:07:38	Tempo:	00:03:50	Tempo:	00:03:02	Tempo:	00:02:37
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	19,5	Inicial:	17,75	Inicial:	16,2	Inicial:	15
Final:	19	Final:	17,3	Final:	16	Final:	14,5
Consumo	0,5	Consumo	0,45	Consumo	0,2	Consumo	0,5
Tempo:	00:08:50	Tempo:	00:03:47	Tempo:	00:03:06	Tempo:	00:02:44
Médias							
Consumo	0,33333333	Consumo	0,5	Consumo	0,4	Consumo	0,5
Tempo:	00:08:19	Tempo:	00:03:46	Tempo:	00:03:05	Tempo:	00:02:40
Altura Maré (mts)	2,85	Altura Maré (mts)	2,9	Altura Maré (mts)	2,63	Altura Maré (mts)	2,43
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 17 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga B

CARGA B							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	15	Inicial:	13	Inicial:	11,25	Inicial:	9,5
Final:	14,25	Final:	12,25	Final:	10,75	Final:	8,5
Consumo	0,75	Consumo	0,75	Consumo	0,5	Consumo	1
Tempo:	00:08:26	Tempo:	00:04:28	Tempo:	00:03:31	Tempo:	00:02:54
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	14,25	Inicial:	12	Inicial:	10,75	Inicial:	8,5
Final:	13,5	Final:	11,75	Final:	10	Final:	8
Consumo	0,75	Consumo	0,25	Consumo	0,75	Consumo	0,5
Tempo:	00:09:03	Tempo:	00:04:43	Tempo:	00:03:24	Tempo:	00:02:53
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,5	Inicial:	11,75	Inicial:	10	Inicial:	8
Final:	13	Final:	11,25	Final:	9,5	Final:	7,75
Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,25
Tempo:	00:07:34	Tempo:	00:04:26	Tempo:	00:03:32	Tempo:	00:02:58
Médias							
Consumo	0,66666667	Consumo	0,5	Consumo	0,58333333	Consumo	0,58333333
Tempo:	00:08:21	Tempo:	00:04:32	Tempo:	00:03:29	Tempo:	00:02:55
Altura Maré (mts)	2,04	Altura Maré (mts)	1,95	Altura Maré (mts)	1,8	Altura Maré (mts)	1,7
Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 18 - Resultados obtidos para o hélice 1 e condição de carga C

CARGA C							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	21	Inicial:	20	Inicial:	18,25	Inicial:	16,5
Final:	20,75	Final:	19,5	Final:	17,8	Final:	16
Consumo	0,25	Consumo	0,5	Consumo	0,45	Consumo	0,5
Tempo:	00:08:33	Tempo:	00:06:04	Tempo:	00:04:04	Tempo:	00:03:16
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	20,75	Inicial:	19,5	Inicial:	17,8	Inicial:	16
Final:	20,25	Final:	18,75	Final:	17,25	Final:	15,5
Consumo	0,5	Consumo	0,75	Consumo	0,55	Consumo	0,5
Tempo:	00:09:24	Tempo:	00:05:24	Tempo:	00:03:46	Tempo:	00:03:14
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	20,25	Inicial:	18,75	Inicial:	17,25	Inicial:	15,5
Final:	20	Final:	18,25	Final:	16,5	Final:	14,75
Consumo	0,25	Consumo	0,5	Consumo	0,75	Consumo	0,75
Tempo:	00:08:33	Tempo:	00:05	Tempo:	00:03:54	Tempo:	00:03:16
Médias							
Consumo	0,33333333	Consumo	0,58333333	Consumo	0,58333333	Consumo	0,58333333
Tempo:	00:08:50	Tempo:	00:05:41	Tempo:	00:03:55	Tempo:	00:03:15
Altura Maré (mts)	1,9	Altura Maré (mts)	2,1	Altura Maré (mts)	2,34	Altura Maré (mts)	2,45
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 19 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga A

CARGA A							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	15	Inicial:	13,5	Inicial:	12,5	Inicial:	11,25
Final:	14,3	Final:	13	Final:	12,25	Final:	11
Consumo	0,7	Consumo	0,5	Consumo	0,25	Consumo	0,25
Tempo:	00:06:21	Tempo:	00:02:33	Tempo:	00:02:04	Tempo:	00:01:54
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	14,3	Inicial:	13	Inicial:	12,25	Inicial:	11
Final:	14	Final:	12,5	Final:	11,8	Final:	10,5
Consumo	0,3	Consumo	0,5	Consumo	0,45	Consumo	0,5
Tempo:	00:06:24	Tempo:	00:02:40	Tempo:	00:02:09	Tempo:	00:01:56
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	14	Inicial:	12,5	Inicial:	11,8	Inicial:	11,5
Final:	13,5	Final:	12,25	Final:	11,25	Final:	10,25
Consumo	0,5	Consumo	0,25	Consumo	0,55	Consumo	1,25
Tempo:	00:06:27	Tempo:	00:02:40	Tempo:	00:02:09	Tempo:	00:01:54
Médias							
Consumo	0,5	Consumo	0,416666667	Consumo	0,416666667	Consumo	0,666666667
Tempo:	00:06:24	Tempo:	00:02:38	Tempo:	00:02:07	Tempo:	00:01:55
Altura Maré (mts)	2,6	Altura Maré (mts)	2,45	Altura Maré (mts)	2,3	Altura Maré (mts)	2,17
Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 20 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga B

CARGA B							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	11	Inicial:	9,5	Inicial:	8	Inicial:	6,9
Final:	10,5	Final:	9,25	Final:	7,75	Final:	6,25
Consumo	0,5	Consumo	0,25	Consumo	0,25	Consumo	0,65
Tempo:	00:06:16	Tempo:	00:03:37	Tempo:	00:02:24	Tempo:	00:02:06
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	10,5	Inicial:	9	Inicial:	7,75	Inicial:	6,25
Final:	10	Final:	8,5	Final:	7,25	Final:	6
Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,25
Tempo:	00:06:42	Tempo:	00:03:17	Tempo:	00:02:24	Tempo:	00:02:10
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	10	Inicial:	8,5	Inicial:	7,25	Inicial:	6
Final:	9,5	Final:	8	Final:	6,9	Final:	5,75
Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,35	Consumo	0,25
Tempo:	00:06:21	Tempo:	00:03:21	Tempo:	00:02:14	Tempo:	00:02:06
Médias							
Consumo	0,5	Consumo	0,416666667	Consumo	0,366666667	Consumo	0,383333333
Tempo:	00:06:26	Tempo:	00:03:25	Tempo:	00:02:21	Tempo:	00:02:07
Altura Maré (mts)	1,8	Altura Maré (mts)	1,62	Altura Maré (mts)	1,5	Altura Maré (mts)	1,4
Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 21 - Resultados obtidos para o hélice 2 e condição de carga C

CARGA C							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20,6	Inicial:	19,5	Inicial:	18	Inicial:	16,9
Final:	20,5	Final:	19,1	Final:	17,5	Final:	16,5
Consumo	0,1	Consumo	0,4	Consumo	0,5	Consumo	0,4
Tempo:	00:06:20	Tempo:	00:04:34	Tempo:	00:03:30	Tempo:	00:02:35
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20,5	Inicial:	19,1	Inicial:	17,5	Inicial:	16,5
Final:	20	Final:	18,6	Final:	17,1	Final:	16
Consumo	0,5	Consumo	0,5	Consumo	0,4	Consumo	0,5
Tempo:	00:05:41	Tempo:	00:04:20	Tempo:	00:02:58	Tempo:	00:02:36
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20	Inicial:	18,6	Inicial:	17,1	Inicial:	16
Final:	19,5	Final:	18	Final:	16,9	Final:	15,5
Consumo	0,5	Consumo	0,6	Consumo	0,2	Consumo	0,5
Tempo:	00:06:10	Tempo:	00:05:02	Tempo:	00:03:11	Tempo:	00:02:29
Médias							
Consumo	0,36666667	Consumo	0,5	Consumo	0,36666667	Consumo	0,46666667
Tempo:	00:06:04	Tempo:	00:04:39	Tempo:	00:03:13	Tempo:	00:02:33
Altura Maré (mts)	0,85	Altura Maré (mts)	0,85	Altura Maré (mts)	0,9	Altura Maré (mts)	0,95
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 22 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga A

CARGA A							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,75	Inicial:	13	Inicial:	11,75	Inicial:	10,75
Final:	13,5	Final:	12,75	Final:	11,5	Final:	10,25
Consumo	0,25	Consumo	0,25	Consumo	0,25	Consumo	0,5
Tempo:	00:06:36	Tempo:	00:02:51	Tempo:	00:02:14	Tempo:	00:01:56
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,5	Inicial:	12,75	Inicial:	11,5	Inicial:	10,25
Final:	13,4	Final:	12,5	Final:	11	Final:	10
Consumo	0,1	Consumo	0,25	Consumo	0,5	Consumo	0,25
Tempo:	00:06:16	Tempo:	00:02:58	Tempo:	00:02:16	Tempo:	00:01:57
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,4	Inicial:	12,5	Inicial:	11	Inicial:	10
Final:	13	Final:	11,75	Final:	10,75	Final:	9,8
Consumo	0,4	Consumo	0,75	Consumo	0,25	Consumo	0,2
Tempo:	00:06:20	Tempo:	00:02:52	Tempo:	00:02:14	Tempo:	00:01:59
Médias							
Consumo	0,25	Consumo	0,416666667	Consumo	0,333333333	Consumo	0,316666667
Tempo:	00:06:24	Tempo:	00:02:54	Tempo:	00:02:15	Tempo:	00:01:57
Altura Maré (mts)	3,35	Altura Maré (mts)	3,55	Altura Maré (mts)	3,65	Altura Maré (mts)	3,7
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 23 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga B

CARGA B							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	21	Inicial:	20,1	Inicial:	19,1	Inicial:	17,6
Final:	20,75	Final:	19,8	Final:	18,5	Final:	17,4
Consumo	0,25	Consumo	0,3	Consumo	0,6	Consumo	0,2
Tempo:	00:06:25	Tempo:	00:03:23	Tempo:	00:02:31	Tempo:	00:02:07
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20,75	Inicial:	19,8	Inicial:	18,5	Inicial:	17,4
Final:	20,5	Final:	19,35	Final:	18	Final:	17,1
Consumo	0,25	Consumo	0,45	Consumo	0,5	Consumo	0,3
Tempo:	00:06:00	Tempo:	00:03:19	Tempo:	00:02:35	Tempo:	00:02:07
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	20,5	Inicial:	19,35	Inicial:	18	Inicial:	17,1
Final:	20,1	Final:	19,1	Final:	17,6	Final:	16,5
Consumo	0,4	Consumo	0,25	Consumo	0,4	Consumo	0,6
Tempo:	00:06:16	Tempo:	00:03:28	Tempo:	00:02:31	Tempo:	00:02:09
Médias							
Consumo	0,3	Consumo	0,33333333	Consumo	0,5	Consumo	0,36666667
Tempo:	00:06:14	Tempo:	00:03:23	Tempo:	00:02:32	Tempo:	00:02:08
Altura Maré (mts)	3,75	Altura Maré (mts)	3,75	Altura Maré (mts)	3,7	Altura Maré (mts)	3,7
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 24 - Resultados obtidos para o hélice 3 e condição de carga C

CARGA C							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	16,5	Inicial:	15,5	Inicial:	14,1	Inicial:	12,9
Final:	16,3	Final:	15,25	Final:	13,8	Final:	12,3
Consumo	0,2	Consumo	0,25	Consumo	0,3	Consumo	0,6
Tempo:	00:06:15	Tempo:	00:03:52	Tempo:	00:03:08	Tempo:	00:02:20
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	16,3	Inicial:	15,25	Inicial:	13,8	Inicial:	12,3
Final:	16	Final:	14,5	Final:	13,25	Final:	11,9
Consumo	0,3	Consumo	0,75	Consumo	0,55	Consumo	0,4
Tempo:	00:06:06	Tempo:	00:03:44	Tempo:	00:03:00	Tempo:	00:02:17
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	16	Inicial:	14,5	Inicial:	13,25	Inicial:	11,9
Final:	15,7	Final:	14,1	Final:	12,9	Final:	11,5
Consumo	0,3	Consumo	0,4	Consumo	0,35	Consumo	0,4
Tempo:	00:05:58	Tempo:	00:04:10	Tempo:	00:02:59	Tempo:	00:02:18
Médias							
Consumo	0,266666667	Consumo	0,466666667	Consumo	0,4	Consumo	0,466666667
Tempo:	00:06:06	Tempo:	00:03:55	Tempo:	00:03:02	Tempo:	00:02:18
Altura Maré (mts)	3,6	Altura Maré (mts)	3,37	Altura Maré (mts)	3,25	Altura Maré (mts)	3
Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante	Estado da Maré	Vazante

Apêndice 25 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga A

CARGA A							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	21	Inicial:	20,6	Inicial:	19,6	Inicial:	18,6
Final:	20,9	Final:	20,5	Final:	19,5	Final:	18,25
Consumo	0,1	Consumo	0,1	Consumo	0,1	Consumo	0,35
Tempo:	00:06:12	Tempo:	00:02:32	Tempo:	00:02:14	Tempo:	00:01:52
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	20,9	Inicial:	20,5	Inicial:	19,5	Inicial:	18,25
Final:	20,75	Final:	20,1	Final:	19	Final:	17,75
Consumo	0,15	Consumo	0,4	Consumo	0,5	Consumo	0,5
Tempo:	00:06:28	Tempo:	00:02:43	Tempo:	00:02:14	Tempo:	00:01:51
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)		Quantidade de Combustível (Its)
Inicial:	20,75	Inicial:	20,1	Inicial:	19	Inicial:	17,75
Final:	20,6	Final:	19,6	Final:	18,6	Final:	17,5
Consumo	0,15	Consumo	0,5	Consumo	0,4	Consumo	0,25
Tempo:	00:05:56	Tempo:	00:02:27	Tempo:	00:02:11	Tempo:	00:01:52
Médias							
Consumo	0,13333333	Consumo	0,33333333	Consumo	0,33333333	Consumo	0,36666667
Tempo:	00:06:12	Tempo:	00:02:34	Tempo:	00:02:13	Tempo:	00:01:52
Altura Maré (mts)	0,87	Altura Maré (mts)	0,95	Altura Maré (mts)	1,05	Altura Maré (mts)	1,15
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 26 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga B

CARGA B							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	17,5	Inicial:	16,5	Inicial:	15,8	Inicial:	14,75
Final:	17,3	Final:	16,25	Final:	15,4	Final:	14,5
Consumo	0,2	Consumo	0,25	Consumo	0,4	Consumo	0,25
Tempo:	00:05:59	Tempo:	00:03:24	Tempo:	00:02:33	Tempo:	00:02:07
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	17,3	Inicial:	16,25	Inicial:	15,4	Inicial:	14,5
Final:	17,25	Final:	16	Final:	15	Final:	13,9
Consumo	0,05	Consumo	0,25	Consumo	0,4	Consumo	0,6
Tempo:	00:06:01	Tempo:	00:03:25	Tempo:	00:02:28	Tempo:	00:02:07
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	17,25	Inicial:	16	Inicial:	15	Inicial:	13,9
Final:	16,5	Final:	15,8	Final:	14,75	Final:	13,25
Consumo	0,75	Consumo	0,2	Consumo	0,25	Consumo	0,65
Tempo:	00:05:45	Tempo:	00:03:24	Tempo:	00:02:30	Tempo:	00:02:07
Médias							
Consumo	0,33333333	Consumo	0,23333333	Consumo	0,35	Consumo	0,5
Tempo:	00:05:55	Tempo:	00:03:24	Tempo:	00:02:30	Tempo:	00:02:07
Altura Maré (mts)	1,3	Altura Maré (mts)	1,55	Altura Maré (mts)	1,65	Altura Maré (mts)	1,75
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 27 - Resultados obtidos para o hélice 4 e condição de carga C

CARGA C							
RPM's:	1	RPM's:	2	RPM's:	3	RPM's:	4
1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio		1º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,5	Inicial:	12,75	Inicial:	11,7	Inicial:	10,6
Final:	13,25	Final:	12,25	Final:	11	Final:	10,25
Consumo	0,25	Consumo	0,5	Consumo	0,7	Consumo	0,35
Tempo:	00:06:00	Tempo:	00:04:29	Tempo:	00:02:58	Tempo:	00:02:26
2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio		2º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	13,25	Inicial:	12,25	Inicial:	11	Inicial:	10,25
Final:	12,9	Final:	11,9	Final:	10,9	Final:	9,9
Consumo	0,35	Consumo	0,35	Consumo	0,1	Consumo	0,35
Tempo:	00:05:55	Tempo:	00:04:29	Tempo:	00:03:02	Tempo:	00:02:27
3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio		3º Ensaio	
	Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)		Quantidade de Combustível (lts)
Inicial:	12,9	Inicial:	11,9	Inicial:	10,9	Inicial:	9,9
Final:	12,75	Final:	11,7	Final:	10,6	Final:	9,25
Consumo	0,15	Consumo	0,2	Consumo	0,3	Consumo	0,65
Tempo:	00:06:11	Tempo:	00:04:31	Tempo:	00:02:56	Tempo:	00:02:24
Médias							
Consumo	0,25	Consumo	0,35	Consumo	0,366666667	Consumo	0,45
Tempo:	00:06:02	Tempo:	00:04:30	Tempo:	00:02:59	Tempo:	00:02:26
Altura Maré (mts)	2,2	Altura Maré (mts)	2,4	Altura Maré (mts)	2,6	Altura Maré (mts)	2,75
Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente	Estado da Maré	Enchente

Apêndice 28 – Tabela resumo dos dados registrados

Hélice 1				Hélice 2				Nota:			
Carga (Kg)	RPM's	Tempo (min's)	Consumo (lts)	Carga (Kg)	RPM's	Tempo (min's)	Consumo (lts)	Carga	Hélice 1		
A	1	8,32	0,33	A	1	6,40	0,50	A	0 Kg	Passo	12"
	2	3,76	0,50		2	2,55	0,42	B	100 Kg	Diâmetro	11,75"
	3	3,08	0,40		3	2,12	0,42	C	200 Kg	Nº Pás	3
	4	2,66	0,50		4	1,91	0,67	RPM's		Hélice 2	
B	1	8,35	0,67	B	1	6,44	0,50	1	Posição 1	Passo	14"
	2	4,54	0,50		2	3,42	0,42	2	Posição 2	Diâmetro	10,1"
	3	3,48	0,58		3	2,34	0,37	3	Posição 3	Nº Pás	4
	4	2,92	0,58		4	2,12	0,38	4	Posição 4	Hélice 3	
C	1	8,83	0,33	C	1	6,06	0,37			Passo	9"
	2	5,69	0,58		2	4,64	0,50			Diâmetro	12,25"
	3	3,91	0,58		3	3,22	0,37			Nº Pás	3
	4	3,26	0,58		4	2,56	0,47			Hélice 4	
Hélice 3				Hélice 4						Passo	13"
Carga (Kg)	RPM's	Tempo (min's)	Consumo (lts)	Carga (Kg)	RPM's	Tempo (min's)	Consumo (lts)			Diâmetro	10,3"
A	1	6,40	0,25	A	1	6,20	0,13			Nº Pás	4
	2	2,89	0,42		2	2,57	0,33				
	3	2,24	0,33		3	2,22	0,33				
	4	1,96	0,32		4	1,86	0,37				
B	1	6,23	0,30	B	1	5,92	0,33				
	2	3,39	0,33		2	3,41	0,23				
	3	2,54	0,50		3	2,51	0,35				
	4	2,13	0,37		4	2,12	0,50				
C	1	6,11	0,27	C	1	6,03	0,25				
	2	3,92	0,47		2	4,49	0,35				
	3	3,04	0,40		3	2,98	0,37				
	4	2,31	0,47		4	2,43	0,45				

Apêndice 29 – Tabela de conversão dos tempos e consumos por teste em consumo horário

Hélice 1			Hélice 2		
Carga (Kg)	RPM's	Consumo horário	Carga (Kg)	RPM's	Consumo horário
A	1	2,40	A	1	4,69
	2	7,98		2	9,79
	3	7,80		3	11,78
	4	11,27		4	20,93
B	1	4,79	B	1	4,66
	2	6,61		2	7,32
	3	10,05		3	9,38
	4	12,00		4	10,84
C	1	2,26	C	1	3,63
	2	6,15		2	6,46
	3	8,95		3	6,84
	4	10,75		4	10,96
Hélice 3			Hélice 4		
Carga (Kg)	RPM's	Consumo horário	Carga (Kg)	RPM's	Consumo horário
A	1	2,34	A	1	1,29
	2	8,64		2	7,79
	3	8,91		3	9,02
	4	9,72		4	11,82
B	1	2,89	B	1	3,38
	2	5,90		2	4,11
	3	11,82		3	8,38
	4	10,34		4	14,17
C	1	2,62	C	1	2,49
	2	7,14		2	4,67
	3	7,90		3	7,39
	4	12,14		4	11,12

Apêndice 30 - Médias e desvios-padrão

Variáveis	Médias	Desvio Padrão
Passo	11,5	2,5
Diâmetro	11,175	1,075
Nº Pás	3,5	0,5
Peso	100	100
Rotações	2,5	1,5
Altura da maré	2,25	1,269215935
Estado da maré	0,5	0,5
Tempo	3,927662	1,888336483
Consumo	0,415278	0,198105417

Apêndice 31 - Dados Normalizados (Hélice 11,25"X12P)

Passo	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Diâmetro	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884	0,534884
Nº Pás	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Peso	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	1	1	1
Rotação	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1
Altura de Maré	0,472733	0,512127	0,299397	0,14182	-0,16546	-0,23637	-0,35455	-0,43334	-0,27576	-0,11818	0,07091	0,157578
Estado da Maré	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Tempo	2,326036	-0,08879	-0,44889	-0,67131	2,341923	0,324274	-0,23707	-0,53362	2,596115	0,933275	-0,00935	-0,35357
Consumo	-0,43047	0,427662	-0,07712	0,427662	1,285791	0,427662	0,831488	0,831488	-0,43047	0,831488	0,831488	0,831488

Apêndice 32 - Dados Normalizados (Hélice 10,1''X14P)

Passo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Diâmetro	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Nº Pás	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	1	1	1
Rotação	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1
Altura de Maré	0,275761	0,157578	0,039394	-0,06303	-0,35455	-0,49637	-0,59092	-0,6697	-1,10304	-1,10304	-1,06365	-1,02425
Estado da Maré	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Tempo	1,309268	-0,72956	-0,95728	-1,06849	1,33045	-0,26884	-0,84077	-0,95728	1,129215	0,37723	-0,37475	-0,72427
Consumo	0,427662	0,023837	0,023837	1,285791	0,427662	0,023837	-0,22855	-0,17808	-0,22855	0,427662	-0,22855	0,276228

Apêndice 33 - Dados Normalizados (Hélice 12,25"X9P)

Passo	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Diâmetro	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nº Pás	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Peso	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	1	1	1
Rotação	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1
Altura de Maré	0,866677	1,024254	1,103043	1,142438	1,181832	1,181832	1,142438	1,142438	1,063649	0,882435	0,787888	0,590916
Estado da Maré	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Tempo	1,309268	-0,54951	-0,89373	-1,04201	1,219241	-0,28473	-0,73486	-0,95198	1,155693	-0,00406	-0,47008	-0,85666
Consumo	-0,83429	0,023837	-0,43047	-0,48094	-0,5819	-0,43047	0,427662	-0,22855	-0,73334	0,276228	-0,07712	0,276228

Apêndice 34 - Dados Normalizados (Hélice 10,3''X13P)

Passo	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Diâmetro	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395	-0,81395
Nº Pás	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	1	1	1
Rotação	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1	-1	-0,33333	0,333333	1
Altura de Maré	-1,08729	-1,02425	-0,94547	-0,86668	-0,74849	-0,55152	-0,47273	-0,39394	-0,03939	0,118183	0,275761	0,393944
Estado da Maré	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tempo	1,203354	-0,71897	-0,90432	-1,09496	1,055076	-0,27414	-0,75075	-0,95728	1,113328	0,297795	-0,50185	-0,79311
Consumo	-1,44003	-0,43047	-0,43047	-0,22855	-0,43047	-0,93525	-0,32951	0,427662	-0,83429	-0,32951	-0,22855	0,175271

Apêndice 35 - Código que analisa as várias combinações de rede

```
%DADOS DE ENTRADA
p=xlsread('Inputs.xlsx');
%DADOS DE SAIDA
t=xlsread('Outputs.xlsx');
%MATRIZ DAS FUNCOES DE TREINO
funtreino={'trainlm','trainrp','traingd'};
%MATRIZ DAS FUNCOES DE TRANSFERENCIA CAMDA DE SAÍDA
funtrans1={'purelin','logsig'};
%MATRIZ DAS FUNCOES DE TRANSFERENCIA CAMDA INTERMÉDIA
funtrans2={'tansig','radbas','hardlims'};
for l=1:3
    for k=1:2
        for j=1:3
            for i=1:20
                %CRIAÇÃO DA REDE
                net=
newff(p,t,i,[funtrans2(j),funtrans1(k)],funtreino{l});
                %DIVISÃO DOS DADOS
                net.divideFcn = 'dividerand'; % DIVIDE OS DADOS
                ALEATORIAMENTE
                net.divideMode = 'sample';
                net.divideParam.trainRatio = 70/100;
                net.divideParam.valRatio = 15/100;
                net.divideParam.testRatio = 15/100;
                %INICIALIZAÇÃO DOS PESOS
                net=init(net);
                %TREINO DA REDE
                [~,tr]= train(net,p,t);
                erros(l,k,j,i,1)=tr.best_perf;
                erros(l,k,j,i,2)=tr.best_vperf;
                erros(l,k,j,i,3)=tr.best_tperf;
            end
        end
    end
end

end
save errosmatriz3 erros %GRAVAR OS ERROS NUM FICHEIRO MAT
```


Apêndice 36 - Linha de comando que analisa o menor erro em cada combinação

```
load('errosmatriz5.mat');
minimo=10;
contador=0;
errofinal=zeros(1,5);
    for i=1:3
        for j=1:2
            for k=1:3
                contador=contador+1;
                [a,b]=min(squeeze(erros(i,j,k,:,:)));
                errofinal(contador,:)=[a(3) b(3) i j k];
            end
        end
    end
end
```


Apêndice 37 - Tabela erros mínimos

Experiência 1					Experiência 2					Experiência 3				
Erro de teste (mínimo)	Neurônios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada	Erro de teste (mínimo)	Neurônios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada	Erro de teste (mínimo)	Neurônios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,137275029	7	1	1	1	0,065953818	1	1	1	1	0,065516212	3	1	1	1
0,163371015	8	1	1	2	0,061712896	4	1	1	2	0,209068596	5	1	1	2
0,340280577	18	1	1	3	0,299907575	7	1	1	3	0,086909304	9	1	1	3
0,392453118	15	1	2	1	0,454665415	9	1	2	1	0,640646572	7	1	2	1
0,612219048	6	1	2	2	0,703212351	5	1	2	2	0,688113348	11	1	2	2
0,430895747	4	1	2	3	0,612393614	6	1	2	3	0,563253771	4	1	2	3
0,172664185	19	2	1	1	0,139709287	1	2	1	1	0,103388351	2	2	1	1
0,19763538	11	2	1	2	0,174076788	4	2	1	2	0,104442807	3	2	1	2
0,197270493	10	2	1	3	0,381894417	3	2	1	3	0,205366418	9	2	1	3
0,318922185	7	2	2	1	0,551042761	14	2	2	1	0,698195376	6	2	2	1
0,578310938	19	2	2	2	0,698014613	2	2	2	2	0,418943699	10	2	2	2
0,473757756	17	2	2	3	0,571849298	12	2	2	3	0,775109433	14	2	2	3
0,118759169	1	3	1	1	0,167667951	1	3	1	1	0,093723658	10	3	1	1
0,290909049	3	3	1	2	0,136608417	13	3	1	2	0,105713041	4	3	1	2
0,142289505	8	3	1	3	0,328016626	5	3	1	3	0,30829025	7	3	1	3
0,611075966	15	3	2	1	0,659019684	18	3	2	1	0,55626087	2	3	2	1
0,714616167	3	3	2	2	0,68607078	12	3	2	2	0,613362573	7	3	2	2
0,696382696	7	3	2	3	0,646572868	12	3	2	3	0,774654769	12	3	2	3
<div>Legenda</div> <div>1º menor erro</div> <div>2º menor erro</div> <div>3º menor erro</div>					Experiência 4					Experiência 5				
					Erro de teste (mínimo)	Neurônios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada	Erro de teste (mínimo)	Neurônios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
					0,140346636	6	1	1	1	0,123095695	2	1	1	1
					0,214145957	3	1	1	2	0,127951049	1	1	1	2
					0,170871665	8	1	1	3	0,22789178	7	1	1	3
					0,727347348	9	1	2	1	0,534995626	15	1	2	1
					0,690134058	10	1	2	2	0,647266423	19	1	2	2
					0,636253015	13	1	2	3	0,611709793	13	1	2	3
					0,131830056	6	2	1	1	0,083821345	7	2	1	1
					0,155880582	4	2	1	2	0,111500342	7	2	1	2
					0,216607855	14	2	1	3	0,277447417	7	2	1	3
					0,528749944	19	2	2	1	0,679552505	1	2	2	1
					0,59864605	6	2	2	2	0,696224709	7	2	2	2
					0,747541531	13	2	2	3	0,612487558	5	2	2	3
					0,137920926	9	3	1	1	0,097756308	5	3	1	1
					0,311588372	4	3	1	2	0,216610916	19	3	1	2
					0,275447287	10	3	1	3	0,343568923	13	3	1	3
					0,72359299	19	3	2	1	0,405188304	10	3	2	1
					0,615473153	13	3	2	2	0,722900989	10	3	2	2
					0,441311759	20	3	2	3	0,714282012	16	3	2	3

Apêndice 38 - Tabela de comparação dos erros de teste com os erros de validação

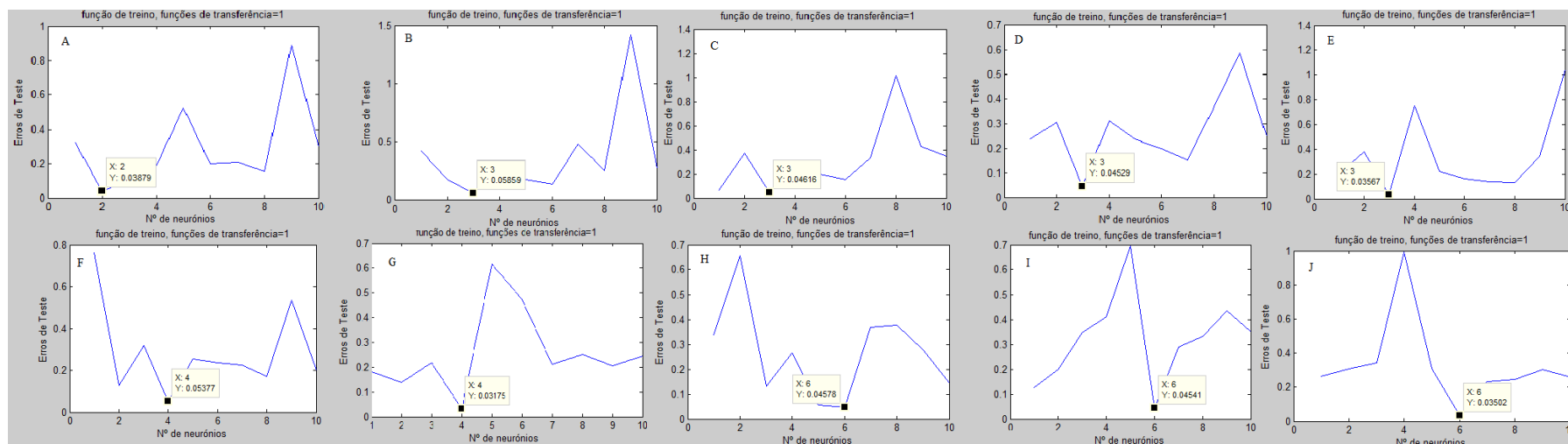
Experiência 1					
Erro de validação	Erro de teste (minimo)	Neurónios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,2841	0,137275	7	1	1	1
0,4384	0,1187592	1	3	1	1
Experiência 2					
Erro de validação	Erro de teste (minimo)	Neurónios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,1432	0,0659538	1	1	1	1
Experiência 3					
Erro de validação	Erro de teste (minimo)	Neurónios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,1798	0,0655162	3	1	1	1
0,1387	0,0937237	10	3	1	1
Experiência 4					
Erro de validação	Erro de teste (minimo)	Neurónios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,1256	0,1403466	6	1	1	1
0,1989	0,1318301	6	2	1	1
0,2437	0,1379209	9	3	1	1
Experiência 5					
Erro de validação	Erro de teste (minimo)	Neurónios	Função treino	Função transferência de saída	Função transferência da camada
0,2152	0,0838213	7	2	1	1
0,1556	0,0977563	5	3	1	1

Apêndice 39 - Programa para se atingir o erro mínimo

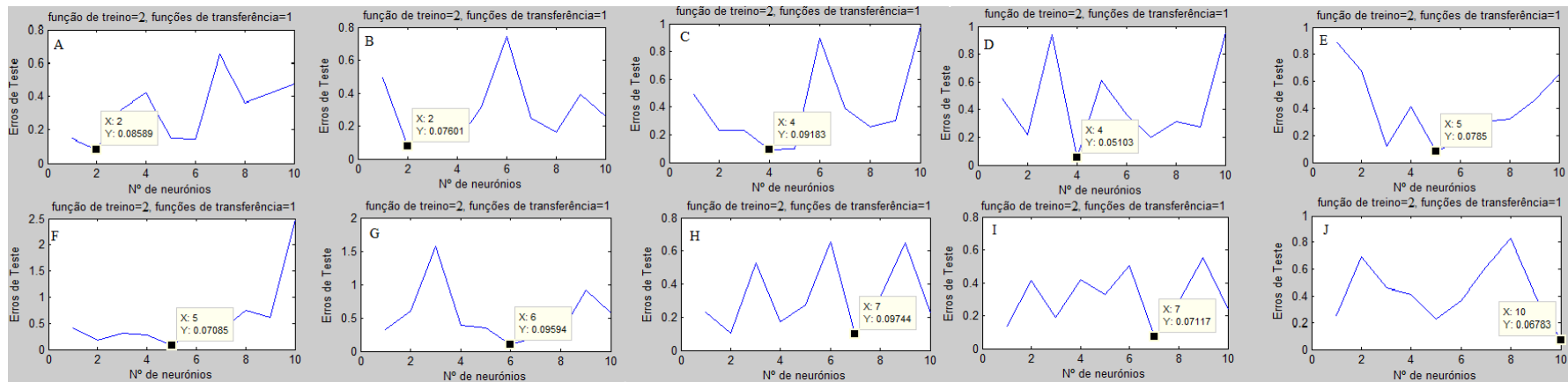
```
%DADOS DE ENTRADA
p=xlsread('Inputs.xlsx');
%DADOS DE SAIDA
t=xlsread('Outputs.xlsx');
minimo=10;
while minimo>0.06
    for i=1:10
        %CRIAÇÃO DA REDE
        net= newff(p,t,i, {'tansig','purelin'},'trainlm');
        %DIVISÃO DOS DADOS
        net.divideFcn = 'dividerand'; % DIVIDE OS DADOS
        ALEATORIAMENTE
        net.divideMode = 'sample';
        net.divideParam.trainRatio = 70/100;
        net.divideParam.valRatio = 15/100;
        net.divideParam.testRatio = 15/100;
        %INICIALIZAÇÃO DOS PESOS
        net=init(net);
        %TREINO DA REDE
        [~,tr]= train(net,p,t);
        erros(1,1,1,i,1)=tr.best_perf;
        erros(1,1,1,i,2)=tr.best_vperf;
        erros(1,1,1,i,3)=tr.best_tperf;
    end
    minimo=min(squeeze(erros(1,1,1,:,3)));
end
save errosmatriz2 erros %GRAVAR OS ERROS NUM FICHEIRO MAT

a=squeeze(erros(1,1,1,:,3));
plot(a);
xlabel 'N° de neurónios'
ylabel 'Erros de Teste'
title 'função de treino, funções de transferência=1'
```

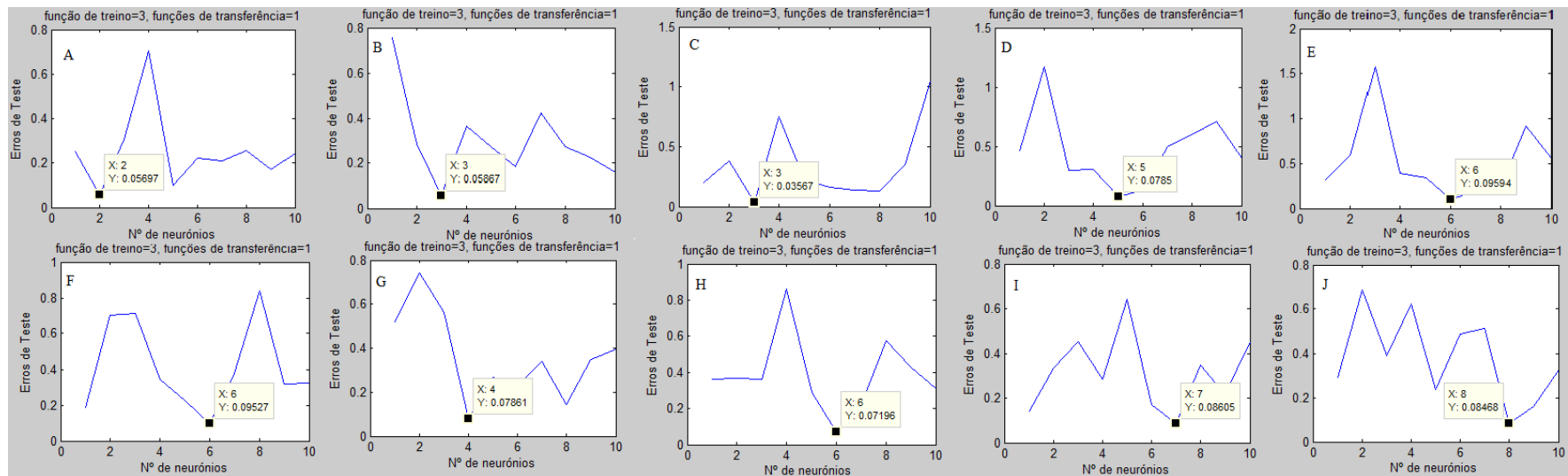

Apêndice 40 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino e de transferências 1



Apêndice 41 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino 2 e de transferências 1



Apêndice 42 - Gráficos do erro em função do número de neurónios para várias divisões dos conjuntos, com a função de treino 3 e de transferências 1



Apêndice 43 – Erros de teste mínimos resultantes do treino com duas camadas intermédias

Rede	Erro de teste	Função de treino	Função de transferência de saída	Função de transferência das camadas	Nº Neurónios 1º Camada	Nº Neurónios 2º Camada
A	0,086226	1	1	1	9	4
B	0,089751	1	1	1	2	7
C	0,092766	2	1	1	3	3
D	0,102622	2	1	1	4	6
E	0,110953	2	1	1	8	4

Apêndice 44 - Linha de código que grava a matriz dos pesos da rede para o erro de teste menor que 0,039

```
%DADOS DE ENTRADA
p=xlsread('Inputs.xlsx');
%DADOS DE SAIDA
t=xlsread('Outputs.xlsx');
b=[2 3 4 6];
for i=1:4
    teste=1;
    while teste<3
        minimo=10;
        while minimo>0.039
            %CRIAÇÃO DA REDE
            net= newff(p,t,b(i),
{'tansig','purelin'},'trainlm');
            %DIVISÃO DOS DADOS
            net.divideFcn = 'dividerand'; %
            %DIVIDE OS DADOS ALEATORIAMENTE
            net.divideMode = 'sample';
            net.divideParam.trainRatio = 70/100;
            net.divideParam.valRatio = 15/100;
            net.divideParam.testRatio = 15/100;
            %INICIALIZAÇÃO DOS PESOS
            net=init(net);
            %TREINO DA REDE
            [~,tr]= train(net,p,t);
            minimo=tr.best_tperf;
        end
        a(i, teste)=minimo;
        if i==4
            wb4(:, teste)=getwb(net);
        end
        if i==3
            wb3(:, teste)=getwb(net);
        end
        if i==2
            wb2(:, teste)=getwb(net);
        end
        if i==1
            wb1(:, teste)=getwb(net);
        end
        teste=teste+1;
    end
end
```


Apêndice 45 – Erros de teste obtidos com a arquitetura de rede A para 2, 3, 4 e 6 neurónios na camada intermédia

		Erro de teste				
		Experiência				
		1	2	3	4	5
Número de Neurónios	2	0,0389	0,0366	0,0225	0,0286	0,0378
	3	0,0252	0,014	0,0365	0,0366	0,0291
	4	0,0283	0,0355	0,0337	0,0306	0,0373
	6	0,0222	0,0302	0,033	0,037	0,0323

Apêndice 46 – Matriz dos pesos das variáveis de entrada para cada neurónio

		Variáveis de entrada						
		Passo	Diâmetro	Nº de pás	Peso	Rotação	Altura de maré	Estado da maré
Neurónio	1	-1,7066	0,3213	1,6806	-1,0832	-0,1699	0,0474	0,2584
	2	0,2594	-0,3451	-0,4456	0,0357	-0,9675	0,1460	-0,0151
	3	-0,3320	0,2241	0,2916	0,6181	1,0888	0,0490	1,2004

Apêndice 47 - Linha de código para utilizar a rede

```
passo=[-1 0.2 0.6 1];
diametro=[-1 -0.814 0.5349 1];
Npas=[-1 1];
peso=[-1 0 1];
rotacoes=[-1 -0.3333 0.3333 1];
alturademare=[-1 0 1];
estadodamare=[-1 1];
load('red.mat', 'net');
for a=1:4
    for b=1:4
        for c=1:2
            for d=1:3
                for e=1:4
                    for f=1:3
                        for g=1:2
                            inputs=[passo(a); diametro(b); Npas(c);
peso(d); rotacoes(e); alturademare(f); estadodamare(g)];
                            outputs=net(inputs);
                            resultados(a,b,c,d,e,f,g,1)=outputs(1);
                            resultados(a,b,c,d,e,f,g,2)=outputs(2);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
end
```


Apêndice 48 - Linha de código para obter o consumo mínimo

```
passo=[9 12 13 14];
diametro=[10.1 10.3 11.75 12.25];
Npas=[3 4];
peso=[0 100 200];
rotacoes=[1 2 3 4];
alturademare=[0.98 2.25 3.5];
estadodamare=[-1 1];
contador=1;
load('resultadostotal.mat', 'resultados')
for d=3:3%PESO
    for e=4:4%RTAÇÖES
        for a=1:4
            for b=1:4
                for c=1:2
                    for f=2:2
                        for g=1:1
                            fina=squeeze(resultados(a,b,c,d,e,f,g,:));
                            dados(contador,:)= [passo(a) diametro(b)
Npas(c) peso(d) rotacoes(e) alturademare(f) estadodamare(g) fina(1)
fina(2) fina(3) fina(4) fina(5)];

consumofinal(contador,:)=resultados(a,b,c,d,e,f,g,5);
                            contador=contador+1;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
[A,I]=min(consumofinal);
```


Apêndice 49 - Tabela com os hélices mais eficientes

Altura de maré média - vazar								Altura de maré média - Encher							
Condição de carga								Condição de carga							
		A		B		C				A		B		C	
		Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)			Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)
Rotações	1	II	3,83	II	2,75	II	2,42	Rotações	1	II	1,44	II	1,5	II	1,73
	2	I	5,38	I	4,08	I	3,2		2	III	2,7	I	2,9	I	2,82
	3	I	7,67	I	5,98	I	5,27		3	I	5,39	I	5,34	I	5,18
	4	I	9,83	I	8,81	I	8,39		4	I	8,64	I	8,57	I	8,42
Altura de maré 0,9 - vazar								Altura de maré 0,9 - Encher							
Condição de carga								Condição de carga							
		A		B		C				A		B		C	
		Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)			Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)
Rotações	1	III	4,28	II	3,23	II	2,78	Rotações	1	III	1,63	II	1,75	I	1,97
	2	I	6,22	I	4,68	I	3,63		2	III	3,17	I	3,27	I	3,16
	3	I	8,91	I	6,81	I	5,95		3	I	6,06	I	5,99	I	5,82
	4	II	10,33	I	9,44	I	8,98		4	I	9,18	I	9,12	I	8,98
Altura de maré 3,5 - vazar								Altura de maré 3,5 - Encher							
Condição de carga								Condição de carga							
		A		B		C				A		B		C	
		Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)			Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)	Hélice	Consumo (l/h)
Rotações	1	II	3,32	II	2,38	II	2,13	Rotações	1	II	1,29	II	1,31	II	1,51
	2	II	4,6	II	3,4	I	2,86		2	II	2,31	I	2,6	I	2,54
	3	I	6,58	I	5,23	I	4,64		3	I	4,76	I	4,74	I	4,59
	4	I	9,02	I	8,14	I	7,75		4	I	8,03	I	7,9	I	7,81

